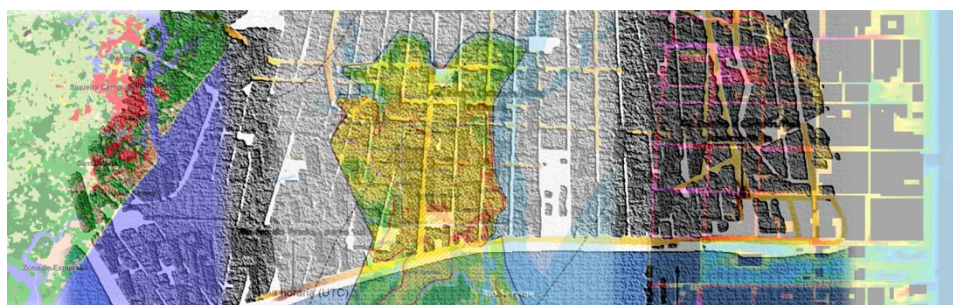


UNIVERSIDADE DE LISBOA
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



Orientações climáticas para o planejamento urbano numa cidade costeira do nordeste do Brasil: Aracaju-SE.

Max Wendell Batista dos Anjos

Orientador: Prof. Doutor António Manuel Saraiva Lopes

Tese especialmente elaborada para obtenção do grau de Doutor em Geografia, especialidade de Geografia Física.

2017



**Orientações climáticas para o planeamento urbano numa cidade
costeira do nordeste do Brasil: Aracaju-SE.**

Max Wendell Batista dos Anjos

Orientador: Prof. Doutor António Manuel Saraiva Lopes

Tese especialmente elaborada para obtenção do grau de Doutor em Geografia, especialidade de Geografia Física.

Júri:

- Presidente: Doutora Maria Lucinda Cruz dos Santos Fonseca, Professora Catedrática e Presidente do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa.

Vogais:

- Doutor Francisco de Assis Mendonça, Professor Titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná, Brasil.
- Doutor Andrews José de Lucena, Professor Adjunto III do Instituto de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil.
- Doutor Nuno Ganho Gomes da Silva, Professor Associado da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.
- Doutora Maria João Alves Pessanha Alcoforado Calhau, Professora Catedrática Aposentada do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa.
- Doutor Marcelo Henrique Carapito Martinho Fragoso, Professor Auxiliar do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa.
- Doutor António Manuel Saraiva Lopes, Professor Auxiliar do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, orientador.

Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)/Ministério da Educação/Brasil.

2017

Agradecimentos

Ao Professor António Lopes pela orientação brilhante e inspiradora deste trabalho;

A todos que fazem parte do grupo de investigação Climate Change and Environmental Systems (ZEPHYRUS)/CEG da Universidade de Lisboa, em especial à Professora Maria João Alcoforado, aos professores Ezequiel Correia, Marcelo Fragoso, Henrique Andrade (em memória) e aos colegas de investigação Raquel Machete e ao Elis Alves agora do Instituto Federal Goiano/Ceres pelas trocas de experiências valiosas;

Ao colega Carlos Santos pela operacionalização técnica;

Ao Professor Gerald Mills pela realização de atividades científicas na University College Dublin – Irlanda;

Aos amigos investigadores dos corredores do “complexo” interdisciplinar, em especial a Inês Boavida Portugal nas provocações filosóficas e motivacionais, a Ana Salomé pelo dispor, e a todos que fazem do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT) um universo prazeroso de aprendizado;

Ao amigo Alysson Fortuna pelas saídas de campo e operação na recolha de dados geográficos;

À especial e amável Giulia Congiu pelo carinho incondicional e inestimável que tanto me estima e conforta;

A todos que fazem a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oportunidade cedida e financiamento deste trabalho;

Aos queridos amigos e amados que, em muito, contribuíram para a realização desta etapa importante da minha vida.: Leandro Gomes pelo companheirismo de sempre, Mariuxi León Molina pela amizade sincera e danças da vida, Mariaelena pelos colchões velhinhos, Anaber Melo e Suzana Pain pelo carinho e confiança, Diego João, Fabrícia e Rodrigo Tomaz pela alegria e parceria, Ney-Dani, Xoro-Leila e Família pelo apoio e consideração, Carlos Guerra, Felipe Furtado e Marcos Silva pelos debates interessantes.

Quero fazer por último uma dedicatória muito especial à minha mãe Marina dos Anjos, irmão Marcondes dos Anjos e família, aos meus tio(a)s Carlos Anselmo e Leuzina e aos primos Jonas Henrique e Joelmir.

A todos, meus sinceros agradecimentos!

*“Em algum lugar, algo incrível está
esperando para ser descoberto.”*

Carl Sagan

Resumo

Propõe-se com este trabalho definir orientações climáticas para o ordenamento do território na cidade de Aracaju, localizada na costa Leste do Nordeste do Brasil, a partir dos estudos de clima urbano. Para isso, adotaram-se vários métodos e ferramentas com o objetivo de produzir informações relevantes do clima urbano através do sensoriamento remoto e de simulações com softwares específicos os quais se integram num ambiente geo-operacional (SIG). Foi implementada uma rede climatológica urbana na cidade com o objetivo de efetuar uma correta avaliação das condições climáticas em vários locais. Essa rede fornece dados meteorológicos semi-horários por um período de 2 anos (2014-2016).

Os resultados deste trabalho apresentam-se a partir da avaliação (bio)climática e avaliação para o ordenamento do território. Em relação ao primeiro aspecto, o estudo apresentado sobre a climatologia da frente de brisa marítima ajudou a averiguar o impacto desse fenômeno nas condições meteorológicas no Estado de Sergipe. Esse estudo revelou, não apenas a existência da frente de brisa incluindo-se o *início*, *duração*, *força* e *avanço em terra* mas, principalmente, constatou que o seu desenvolvimento está relacionado com dias mais quentes, pois foi verificado durante os dias com brisa o aumento médio da temperatura do ar de 1°C e da radiação solar na ordem de 290 KJ m⁻². Os padrões térmicos existentes na cidade foram levados em consideração no quadro de avaliação climática. Com base na rede climatológica urbana, foi demonstrado que a intensidade média da Ilha de Calor Urbana de Aracaju quer a diurna quer a noturna não foi expressiva, variando aproximadamente 0.5°C na estação quente, na estação fresca as intensidades aumentaram em média 1.3°C devido à redução das velocidades médias dos ventos. Enquanto a Ilha de Frescor Urbana, que avalia a influência dos espaços verdes na redução da temperatura em relação ao espaço construído envolvente, mostrou-se dinâmica sazonal e diária com a redução média da temperatura até 2°C. Parelamente, verificou-se a existência de climas locais bem definidos e influenciados pela geometria urbana, espaços verdes e corpos d'água mais expostos à ação dos ventos. Esses climas locais geraram diferentes condições de conforto térmico em Aracaju.

Em linhas gerais, as condições de conforto térmico analisadas neste estudo aparentam ser preocupantes para a saúde da população. Os resultados demonstram que, durante as tardes quentes (estação quente), a população está submetida ao estresse térmico do *moderado* ao *acentuado*, uma vez que, as classes da Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) “*quente*” e “*muito quente*” (valores médios horários do PET entre 29°C a 35°C) a prevalecerem com frequências relativas chegaram a 30% dos 19.640 casos analisados. Os resultados evidenciaram também, de forma contundente, a contribuição negativa do desenvolvimento da frente de brisa no conforto térmico em Aracaju, ao se verificar um aumento até 2°C nos valores do PET nos dias com brisa marítima.

Foi apresentado o estudo sobre a qualidade do ar em Aracaju, baseado no modelo de concentração de poluentes atmosféricos a partir do tráfego de automóveis (modelo CAL3QHC). Os resultados permitiram discutir mais abertamente o problema da poluição do ar na cidade. As simulações demonstraram que os níveis de concentrações de material particulado (MP₁₀) (127 µg m⁻³) ultrapassaram os limites aceitáveis de boa qualidade do ar adotado nas cidades brasileiras.

No contexto da avaliação climática para o ordenamento do território, foram delimitadas as Unidades de Resposta Climática Homogênea (URCH) a partir do cruzamento entre a morfologia urbana e as classes de ventilação. Às URHC, sobrepueram-se as *Local Climate Zones* e as informações sobre o conforto térmico, a poluição do ar e a frente de brisa com objetivo de dar maior consistência ao sistema de avaliação climática. Como resultado, foram definidas seis URCH para Aracaju, a partir das quais foi lançado um plano de ação com orientações climáticas relevantes com vistas a melhorar (i) as condições de conforto térmico mitigando o excesso de calor, (ii) as condições de ventilação e (iii) a qualidade do ar. Em seguida, compararam-se as orientações climáticas especializadas com o marcozoneamento proposto pelo Plano Diretor de Desenvolvimento de Aracaju – PDDU/2015, a fim de compreender a relação entre as diretrizes normativas do uso e ocupação do solo e as características do clima urbano, como por exemplo, recomendou-se evitar novas áreas urbanas onde novo núcleo de Ilha de Calor Urbano possa aparecer no futuro. Assim, entende-se que, ao considerar o conhecimento climático no ordenamento do território, melhora-se a qualidade do ambiente urbano.

Abstract

This work aims at defining the climatic guidelines for urban planning in the city of Aracaju, located on the Northeast coast of Brazil, from the urban climate studies. In order to achieve this, several methods and tools by remote sensing and simulations with specific software have been used to provide relevant information on urban climate, which were integrated into a geo-operational environment (GIS). In addition, an urban climatological network was implemented in the city aiming at evaluating the thermal patterns in several locations. This network provided high-quality semi-hourly data over a period of 2 years (2014-2016).

The results of this thesis are presented from the (bio)climatic assessment and urban planning. Regarding the first aspect, a study about the sea breeze front that helped to evaluate its impact on the meteorological conditions of the State of Sergipe was presented. This study not only revealed the existence of the sea breeze front including its onset, cessation, duration, strength, and inland penetration, but mostly found that the development of the sea breeze front is related to warmer days, since breeze days the average temperature increases by 1°C and the solar radiation by 290 KJ m^{-2} . The existing thermal patterns of the city were taken into consideration for the climate assessment framework. Based on the urban climatological network, it was demonstrated that the average intensity of the Urban Heat Island in Aracaju, both diurnal and nocturnal, was not significant and it varied approximately by 0.5°C in the hot season and cool season the intensities increased by 1.3°C , on average, due to wind speed decrease. On the other hand, the Park Cool Island, which considers the role played by green spaces in temperature reduction in relation to the immediate surroundings, showed seasonal and daily dynamics, decreasing average temperature by up to 2°C . At the same time, well-defined local climates were influenced by a combination of features such as urban geometry, green spaces, and bodies of water that are more exposed to the action of the winds. These local climates generated different thermal comfort conditions in Aracaju.

Overall, the thermal comfort conditions analyzed in this study appear to be worrying for the health of the population. Results show that during hot afternoons (hot season), the population had to endure from moderate to severe thermal stress, since the 'hot' and 'very hot' classes of the Physiological Equivalent Temperature (PET) prevailed (average hourly PET values between 29°C and 35°C) and their relative frequencies reached 30% of the 19,640 cases analyzed. These results also clearly showed the negative contribution of the development of the sea breeze front on the thermal comfort in Aracaju, when PET increased by up to 2°C during the sea breeze front days.

A study on the quality of the air in Aracaju based on the atmospheric concentration modeling (CAL3QHC model) from the vehicle traffic was presented. The results allow discussing more openly the problem of air pollution in the city. The simulations showed that particulate matter (PM_{10})

concentrations ($127 \mu\text{g m}^{-3}$) exceeded the acceptable limits of good air quality adopted in Brazilian cities.

In the context of climatic assessment for urban planning, Homogeneous Climate-Response Units (HCRU) were defined from the intersection of urban morphology and ventilation classes. HCRU were coupled with Local Climate Zones and the information on thermal comfort, air pollution, and the sea breeze front provided more consistency to the climatic assessment system. As a result, six HCRU were defined in Aracaju, from which an action plan with a set of climatic guidelines for the planning bodies was presented with the objective of improving (i) the thermal comfort conditions mitigating the excess heat, (ii) the ventilation conditions, and (iii) air quality. Subsequently, in order to understand the relationship between normative land use guidelines and urban climate characteristics, the spatialized climatic guidelines were compared with the framework proposed by the Aracaju Development Master Plan /2015. For instance, it is advisable to prevent new urban areas where new nucleus of Urban Heat Island can appear in the future. Thus, it is our understanding that, when the knowledge about urban climate is considered for planning purposes, the quality of the urban environment improves.

Índice Geral

| | |
|--|--------------|
| Agradecimentos | i |
| Resumo..... | v |
| Abstract..... | vii |
| Índice Geral | ix |
| Lista de acrónimos, silgas e símbolos..... | xv |
| Índice de Figuras..... | xvii |
| Índice de Tabelas..... | xxiii |
| INTRODUÇÃO | 1 |
| 1 Enquadramento do tema | 1 |
| 1.1 No contexto da habitabilidade urbana | 1 |
| 1.2 Clima urbano e planeamento | 4 |
| 1.3 Aplicação dos mapas climáticos urbanos..... | 7 |
| 2 Motivação e problema em questão | 8 |
| 3 Objetivos..... | 9 |
| 4 Estrutura da tese | 9 |
| 5 Enquadramento geográfico..... | 11 |
| 5.1 Área de estudo..... | 11 |
| 5.2 Traços da morfologia urbana..... | 13 |
| 5.3 Estudos de clima urbano em Aracaju | 16 |
| Capítulo 1: Frente de Brisa Marítima no Estado de Sergipe | 19 |
| 1 Introdução | 19 |
| 1.1 Frente de Brisa Marítima | 20 |
| 1.2 Métodos para a identificação da FBM | 22 |
| 2 Objetivos..... | 24 |
| 3 Materiais e métodos..... | 25 |
| 3.1 Área de estudo..... | 25 |
| 3.2 Conjunto de dados..... | 26 |
| 3.3 Método para identificar a FBM..... | 27 |
| 3.4 Climatologia da frente de brisa-SE..... | 29 |
| 4 Resultados | 31 |
| 4.1 Padrões dos ventos regionais | 31 |
| 4.2 Análise das condições sinóticas e das TSM | 34 |
| 4.3 Característica observada da FBM | 36 |
| 4.3.1 Ocorrência e ciclo diário..... | 36 |
| 4.3.2 Organização espaciotemporal..... | 38 |
| 4.3.3 Avanço no interior do continente..... | 40 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 4.4 | Relação entre a FBM e as condições meteorológicas | 42 |
| 5 | Discussão | 44 |
| 5.1 | Padrões dos ventos regionais | 44 |
| 5.2 | Frente de brisa marítima em Sergipe..... | 45 |
| 5.3 | Limitações | 47 |
| 6 | Conclusão..... | 48 |
| | Capítulo 2: Rede Climatológica Urbana..... | 49 |
| 1 | Introdução | 49 |
| 2 | Descrição da rede | 51 |
| 2.1 | Seleção dos locais de observação | 51 |
| 2.2 | Operação..... | 53 |
| 2.3 | Metadados | 56 |
| 3 | Conclusão..... | 57 |
| | Capítulo 3: Climas locais, Ilha de Calor e Ilha de Frescor Urbanos.. | 59 |
| 1 | Introdução | 59 |
| 1.1 | Tipos e estrutura da ICU..... | 59 |
| 1.2 | As várias abordagens para o estudo da ICU | 61 |
| 1.3 | Ilha de Frescor Urbano..... | 63 |
| 1.4 | A influência da brisa marítima na ICU..... | 64 |
| 2 | Objetivos..... | 65 |
| 3 | Materiais e métodos..... | 65 |
| 3.1 | Conjunto de dados..... | 66 |
| 3.2 | Análise da diferença de temperatura intraurbana: desvios térmicos.. | 66 |
| 3.3 | Definição das intensidades da ICU e IFU | 67 |
| 3.4 | Estratificação das velocidades do vento e definição das condições de nebulosidade..... | 70 |
| 3.5 | Dados da frente de brisa marítima | 70 |
| 4 | Resultados | 71 |
| 4.1 | Variação diária da temperatura e umidade relativa | 71 |
| 4.2 | Desvios térmicos: variação horária sazonal e frequências relativas.... | 72 |
| 4.3 | Estatística das intensidades da ICU e IFU | 74 |
| 4.3.1 | Síntese da série analisada | 74 |
| 4.3.2 | Frequências relativas..... | 74 |
| 4.3.3 | Número de observações iguais ou superiores a 2°C..... | 76 |
| 4.3.4 | Relação entre as intensidades da ICU e IFU e a velocidade do vento | 76 |
| 4.3.5 | Relação entre as intensidades da ICU e IFU e a nebulosidade..... | 78 |
| 5 | Discussão | 80 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1 | Climas locais | 80 |
| 5.2 | Ilha de Calor Urbano..... | 81 |
| 5.3 | Ilha de Frescor Urbano..... | 83 |
| 5.4 | A relação entre a ICU e IFU e a frente de brisa marítima..... | 85 |
| 5.5 | Limitações | 85 |
| 6 | Conclusão..... | 86 |
| | Capítulo 4: Avaliação do conforto térmico | 89 |
| 1 | Introdução | 89 |
| 1.1 | Aplicabilidade do índice PET | 90 |
| 1.2 | Impacto da frente brisa marítima sobre o conforto térmico | 92 |
| 2 | Objetivos..... | 93 |
| 3 | Materiais e métodos..... | 94 |
| 3.1 | Dados usados e cálculo do PET..... | 94 |
| 3.2 | Análise dos dados..... | 95 |
| 3.3 | Modelação do PET à escala mesoclimática..... | 96 |
| 4 | Resultados | 97 |
| 4.1 | Variação horária da velocidade do vento e radiação solar..... | 97 |
| 4.2 | Variação diária sazonal da temperatura radiativa média e do PET ... | 98 |
| 4.3 | Frequências relativas diárias do PET | 101 |
| 4.4 | Variação diária do PET em eventos de frente de brisa (FBM)..... | 103 |
| 4.5 | Modelação espacial dos valores do PET..... | 104 |
| 5 | Discussão..... | 106 |
| 5.1 | Limitações | 108 |
| 6 | Conclusão..... | 109 |
| | Capítulo 5: Avaliação da qualidade do ar | 111 |
| 1 | Introdução | 111 |
| 1.1 | Norma legislativa da qualidade do ar nas cidades brasileiras..... | 111 |
| 1.2 | Escala de análise e controlos atmosféricos | 115 |
| 1.3 | Modelos de dispersão de poluentes | 119 |
| 2 | Objetivos..... | 121 |
| 3 | Materiais e métodos..... | 122 |
| 3.1 | Dados para a análise dos poluentes monitorados | 122 |
| 3.2 | Dados de entrada do modelo CAL3QHC | 122 |
| 3.2.1 | Geometria do link e receptores..... | 122 |
| 3.2.2 | Fator de emissão | 124 |
| 3.2.3 | Condições atmosféricas controladoras | 125 |
| 3.3 | Dados de saída do modelo CAL3QHC: mapa das concentrações de MP ₁₀ | 126 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 4 | Resultados | 127 |
| 4.1 | Análise dos dados semanais monitorados | 127 |
| 4.2 | Simulação das concentrações de PM ₁₀ no período da manhã | 128 |
| 4.3 | Simulação das concentrações de PM ₁₀ no período da noite | 129 |
| 5 | Discussão | 131 |
| 5.1 | Limitações | 132 |
| 6 | Conclusão..... | 133 |
| | Capítulo 6: As Unidades de Resposta Climática Homogêneas (URCH) de Aracaju | 137 |
| 1 | Introdução | 137 |
| 1.1 | Experiências e lições de casos de estudo | 139 |
| 2 | Materiais e métodos..... | 148 |
| 3 | Mapa da morfologia urbana | 149 |
| 3.1 | Cartografia do Fator de Visão do Céu (camada 1) | 149 |
| 3.1.1 | Dados de entrada e operação no ambiente SIG..... | 150 |
| 3.1.2 | Validação do FVC..... | 152 |
| 3.1.3 | Mapeamento do FVC..... | 155 |
| 3.2 | Cartografia dos espaços verdes (camada 2)..... | 157 |
| 3.2.1 | Dados de entrada e operação no ambiente SIG..... | 157 |
| 3.2.2 | Mapeamento dos espaços verdes | 157 |
| 3.3 | Resultado do mapeamento da morfologia urbana..... | 158 |
| 4 | Mapa de classes de ventilação..... | 160 |
| 4.1 | Cartografia da rugosidade aerodinâmica (camada 3)..... | 160 |
| 4.1.1 | Dados de entrada e operação no ambiente SIG..... | 161 |
| 4.1.2 | Mapeamento da rugosidade aerodinâmica | 163 |
| 4.2 | Cartografia dos corredores de ventilação (camada 4) | 165 |
| 4.2.1 | Dados de entrada e operação no ambiente SIG..... | 165 |
| 4.2.2 | Mapeamento dos corredores de ventilação | 166 |
| 4.3 | Resultado do mapeamento das classes de ventilação | 167 |
| 5 | Mapa das Local Climate Zones (camada 5) | 169 |
| 5.1 | Dados de entrada e operação no ambiente SIG..... | 171 |
| 5.2 | Apresentação das LCZs em Aracaju | 173 |
| 5.3 | Precisão do mapa das LCZs..... | 174 |
| 5.4 | Relação entre as LCZs e os padrões de temperatura..... | 175 |
| 5.5 | Redefinição das LCZs | 178 |
| 6 | Informações adicionais sobre o conforto térmico, poluição do ar e frente de brisa marítima | 181 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 7 | Mapa final das Unidades de Resposta Climática Homogênea (URCH) analisado com as LCZs | 181 |
| 7.1 | Caracterização das URCH..... | 183 |
| | Capítulo 7: Estudos microclimáticos na área central da cidade..... | 189 |
| 1 | Introdução | 189 |
| 2 | Estudo 1: influência da geometria urbana nas condições climáticas | 190 |
| 2.1 | Aplicação do modelo microclimático ENVI-met | 190 |
| 2.2 | Processo de obtenção do modelo validado..... | 191 |
| 2.3 | Resultados | 193 |
| 2.4 | Cenário para avaliar o potencial das árvores na redução da temperatura | 195 |
| 3 | Estudo 2: medidas de redução da poluição do ar nas vias de circulação... | 196 |
| 3.1 | Aplicação do modelo CAL3QHC..... | 196 |
| 3.2 | Resultados | 197 |
| 3.3 | Aplicação da ferramenta I-tree canopy..... | 198 |
| 3.4 | Resultados | 199 |
| 4 | Conclusão..... | 201 |
| | Capítulo 8: Plano de ação para o ordenamento do território baseado na avaliação climática..... | 203 |
| 1 | Introdução | 203 |
| 2 | Orientações climáticas gerais para mitigar o efeito adverso do clima de Aracaju | 204 |
| 2.1 | Medidas para mitigar o estresse térmico | 204 |
| 2.1.1 | Medida 1: criação adequada de espaços verdes | 204 |
| 2.1.2 | Medida 2: proteção contra a temperatura radiativa média (T_{trm}) excessiva | 206 |
| 2.1.3 | Medida 3: Melhoria da ventilação no espaço urbano | 207 |
| 2.1.4 | Medida 4: controle do Fator de Visão do Céu (FVC) | 207 |
| 2.2 | Medidas para melhorar a qualidade do ar | 208 |
| 3 | Orientações climáticas espacializadas nas escalas meso e microclimáticas | 210 |
| 4 | Orientações climáticas e o macrozoneamento urbano | 213 |
| | Capítulo 9: Conclusão..... | 221 |
| | PERSPECTIVA INVESTIGATIVA E TRABALHOS FUTUROS | 225 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 227 |
| | ANEXO | 247 |

Lista de acrónimos, silgas e símbolos

| | |
|-------------------|--|
| ADEMA | - Administração Estadual do Meio Ambiente Sergipe |
| ASAS | - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul |
| CAL3QHC | - <i>California Line Source for Queuing & Hot Spot Calculations Refined</i> |
| CC | - Centro da Cidade (estação urbana) |
| CFD | - <i>Computational Fluid Dynamics</i> |
| CLA | - Camada limite atmosférica |
| CLUHI | - Ilha de Calor da Atmosfera Urbana Inferior (°C) |
| CO | - Monóxido de carbono ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
| FE | - Fator de emissão (g km^{-1} ou g h^{-1}) |
| FVC | - Fator de Visão do Céu (<i>Sky View Fator</i> em inglês) (0-1) |
| ICU | - Ilha de Calor Urbano (°C) |
| IFU | - Ilha de Frescor Urbano (°C) |
| IICU | - Intensidade da Ilha de Calor Urbano (°C) |
| IIFU | - Intenisdade da Ilha de Frescor Urbano (°C) |
| JAR | - Jardins (estação urbana) |
| LCZ | - <i>Local Climate Zones</i> |
| MCU | - Mapa Climática Urbano |
| MDT | - Modelo Digital do Terreno |
| MP | - Material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
| MP ₁₀ | - Partículas com diâmetro inferior a 10 μm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
| MP _{2.5} | - Partículas ultrafinas com diâmetro inferior 2.5 μm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
| NDVI | - Normalized Difference Vegetation Index |
| NEB | - Nordeste do Brasil |
| O ₃ | - Ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
| OMM | - Organização Mundial Meteorológica |
| PC | - Parque da Cidade (estação urbana) |
| PDDU | - Plano Diretor de Desenvolvimento de Aracaju |
| PET | - Temperatura Equivalente Fisiológica (<i>Physiologically Equivalent Temperature</i>) (°C) |
| PJS | - Praia José Sarney (estação urbana) |
| PRONAR | - Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar |
| PTS | - Partículas totais em suspensão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
| Q* | - Balanço de radiação (W m^{-2}) |
| QE | - Fluxo turbulento de calor latente (W m^{-2}) |
| Q _F | - Fluxo de calor antrópico (0 -400 W m^{-2}) |
| QF | - Fluxo de calor antrópico (W m^{-2}) |
| QH | - Fluxo turbulento de calor sensível (W m^{-2}) |
| RCU | - Rede Climatológica Urbana |
| RS | - Radiação Solar (k/jm^2) |
| SBM | - Sistema Brisa Marítima |
| SCA | - Siqueira Campos (estação urbana) |
| SE | - Estado de Sergipe |
| SIG | - Sistema de Informação Geográfica |
| SPI | - <i>Standardized Precipitation Index</i> (Índice de precipitação padronizado) |
| STM | - Santa Maria (estação urbana) |
| T _a | - Temperatura do ar (°C) |
| T _{mrt} | - Temperatura radiativa média (°C) |
| TSM | - Temperatura Superficial do Mar (°C) |

| | |
|-------------|---|
| UCRH | - Unidades de Resposta Climática Homogênea |
| UR | Umidade relativa do ar 8%) |
| v | - Velocidade do vento (m/s^{-1}) |
| VCAN | - Vórtice Ciclônico de Altos Níveis |
| W/H | - Relação entre altura e largura dos edifícios |
| ZAB | - Zona de Adensamento Básico |
| ZAC | - Zona de Adensamento Controlado |
| ZAP | - Zona de Adensamento Preferencial/Prioritário |
| ZAR | - Zona de Adensamento Restrito |
| ZE | - Zona de Expansão (estação urbana) |
| ΔQA | - Fluxo horizontal advectivo através da camada limite urbana. |
| ΔQS | - Fluxo de calor armazenado no solo e nos edifícios (W m^{-2}) |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura I.1: Raking dos melhores e piores lugares no mundo para se viver em 2015. | 2 |
| Figura I.3: Localização geográfica de Aracaju..... | 12 |
| Figura I.4: Densidade populacional por setor baseado no censo do IBGE, 2010. | 13 |
| Figura I.6: Classificação do uso do solo de Aracaju com base nas respostas espectrais nos canais do visível a infra-vermelho próximo das imagens de Landsat 2/2014..... | 14 |
| Figura I.7: Vista área da morfologia urbana de Aracaju. | 15 |
| Figura 1: SBM adaptado de Miller et. al.,(2003)..... | 20 |
| Figura 2: Localização geográfica das estações meteorológicas de superfície (Google Earth, 2016). | 25 |
| Figura 3: Método para identificar a FBM..... | 27 |
| Figura 4: Recorte das imagens de satélite GOES-13 do canal visível com resolução de 1km sobre o Estado de Sergipe. | 30 |
| Figura 5: Climatologia média escalar da velocidade do vento espacializadas na parte Oeste do Atlântico Sul. | 32 |
| Figura 6: Frequência da velocidade e direção do vento de setes estações meteorológicas de superfície referente ao período 2014-2017. | 33 |
| Figura 7: Situações sinóticas sobre América do Sul no dia com FBM (03/01/2015) e no dia sem FBM (15/12/2014)..... | 35 |
| Figura 8: Imagens de satélite do AVHRR mostrando a TSM adjacente a região do nordeste do Brasil para três <i>dias com FBM</i> (A – 25-12-2504), (B- 03-01-2015), (C – 06-02-2015) e três <i>dias sem FBM</i> (D- 15-12-2014), (E – 07-02-2015), (F – 09-01-2015). | 36 |
| Figura 9: Número de ocorrência horária e força (velocidade do vento) da FBM no verão 2015. | 37 |
| Figura 10: Espacialização horária das isócronas da FBM para os meses de dezembro de 2014 (A), janeiro (B), fevereiro (C) e março de 2015 (D). | 38 |
| Figura 11: Isócronas representando a média da passagem horária da FBM sintetizadas para os meses do verão 2015. | 39 |
| Figura 12: Isócronas representando a média horária do avanço da FBM durante março de 2015. | 41 |
| Figura 13: Médias horárias de seis variáveis meteorológicas sobre a região de Sergipe nos dias com FBM e nos dias sem FBM no verão 2015..... | 44 |
| Figura 14: Rede Climatológica Urbana de Aracaju (2014-2016)..... | 52 |
| Figura 15: Instalação dos sensores da RCU a 3,5m acima do solo..... | 54 |
| Figura 17: Tipos e subtipos da ICU adaptado de Oke (2009)..... | 59 |
| Figura 18: Grupos de similaridade térmica entre as estações urbanas no período de 2014-2016, adaptado de Anjos e Lopes (2015)..... | 67 |
| Figura 19: RCU e a definição dos grupos com similaridade térmica. | 68 |
| Figura 20: Desvios térmicos horários das estações urbanas em relação à Zona de Expansão referente a estação quente (A) e a estação fresca (B) no período 2014-2016. | 72 |

| | |
|---|-----|
| Figura 21: Frequências relativas dos desvios térmicos das estações urbanas em relação à Zona de Expansão no período de 2014-2016. | 73 |
| Figura 22: Síntese da série completa das intensidades da ICU (A) e da IFU (B) referente ao período de 2014-2016. | 74 |
| Figura 23: Frequência sazonal das intensidades da ICU (A) e IFU (B) durante o período diurno (10:00-20:00h) e noturno (22:00-07:00h) entre 2014-2016. | 75 |
| Figura 24: Média horária e número de observações maiores ou iguais a 2°C das intensidades da ICU e IFU no período 2014-2016. | 76 |
| Figura 25: Média horária das intensidades da ICU e IFU e da velocidade do vento no período 2014-2016. | 77 |
| Figura 26: Distribuição dos valores de intensidade da (A) ICU e (B) IFU de acordo com a velocidade do vento no período 2014-2016. | 78 |
| Figura 27: Distribuição dos valores de intensidade da (A) ICU e (B) IFU de acordo com a condição de céu no período 2014-2016. | 79 |
| Figura 28: Comparação das intensidades da ICU (A) e IFU (B) nos dias com brisa marítima e nos dias sem brisa marítima no verão 2015. | 85 |
| Figura 29: Média horária sazonal das velocidades do vento para as estações do Aeroporto e INEMT recalculadas para 1.1 metros acima do solo e da radiação solar medida a 2 metros, no período 2014-2016. | 98 |
| Figura 30: Média horária sazonal da temperatura e umidade relativa de sete estações urbanas e duas estações meteorológicas no período 2014-2016. | 71 |
| Figura 31: Médias horárias sazonais da temperatura radiativa média e do PET estimadas a 3.5 metros acima do solo referentes às estações urbanas da RCU, no período de 2014-2016. | 99 |
| Figura 32: Médias horárias sazonais dos valores do PET de sete estações urbanas estimados a 3.5 metros acima do solo no período 2014-2016. | 100 |
| Figura 33: Frequência diurna (10h às 20h) e noturna (22h às 07h) das classes do PET de sete estações urbanas no período 2014-2016. | 102 |
| Figura 34: Comparação das médias horárias do PET das estações urbanas nos dias com FBM e nos dias sem FBM no verão 2015. | 103 |
| Figura 35: Mapa bioclimático de Aracaju para situação típica de forte estresse térmico relacionada com a passagem da frente de brisa no verão 2015. | 105 |
| Figura 36: Evolução da frota de veículos por categoria em Aracaju 2003-2016. Fonte: Departamento Estadual de Trânsito de Sergipe – DETRAN/SE, 2016. | 114 |
| Figura 37: Vista no plano da variação perpétua da direção do vento e os contornos aproximados de uma pluma de fumaça quando observada instantaneamente em média em períodos de 10 minutos e 2 horas. | 116 |
| Figura 38: A influência dos edifícios na poluição do ar urbana (adaptado de Oke, 1987, p.273). | 117 |
| Figura 39: Zona de mistura usada no cálculo das concentrações de poluentes atmosféricos próximo a vias. Adaptação do manual do usuário CALroads (Copyright © 2001-2008 Lakes Environmental Software). | 121 |
| Figura 41: Dados semanais das concentrações de PTS, fumaça e MP ₁₀ medidos a partir de uma estação de monitoramento da qualidade do ar em Aracaju no período entre 2013 a 2015. Fonte: ADEMA, 2016. | 127 |

| | |
|---|-----|
| Figura 42: Concentrações de MP_{10} nas vias de circulação na área central da cidade, estimadas pelo modelo CAL3QHC referente ao pico de fluxo de automóveis na manhã (07:00-09:00h - local) durante o verão de 2015. | 129 |
| Figura 43: Concentrações de MP_{10} nas vias de circulação da área central da cidade, estimadas pelo modelo CAL3QHC referente ao pico de fluxo de automóveis na noite (17:00-19:00h) durante o verão de 2015. | 130 |
| Figura 44: Mapas climáticos urbanos no mundo (Ren, 2015)..... | 139 |
| Figura 45: Exemplo de Mapa Climático Urbano na cidade de Stuttgart (Klimaatlas, 1992)..... | 140 |
| Figura 46: MCU de Hong Kong (Ng et al., 2008) | 141 |
| Figura 48: Exemplos de mapas climáticos urbanos nas cidades portuguesas de Lisboa (A), Cascais (B), Funchal\Ilha da Madeira (C) e Figueira da Foz (D).143 | |
| Figura 49: MCUs de Salvador baseando nas classes do uso do solo (A) e ventilação (B). Adaptado de Andrade et al., (2015)..... | 144 |
| Figura 50: Mapa Climático de Maceió –AL. Adaptado de Melo (2009)..... | 145 |
| Figura 51: Mapa de Análises Climáticas de João Pessoa – PB. Adaptado de Ribeiro (2013). | 146 |
| Figura 52: Zoneamento climático urbano em Recife. Adaptado de Barros e Lombardo (2013). | 146 |
| Figura 53: URCH de Campinas adaptado de Shimomura et al., (2015)..... | 147 |
| Figura 54: Metodologia para a construção das URCH de Aracaju..... | 149 |
| Figura 55: (A) elevação de ângulos para diferentes objetos (edifício e árvore) numa dada direção e (B) polígonos no hemisfério correspondentes a um edifício e aos dois tipos de cobertura de árvores (T_1 e T_2) (Gál e Unger, 2014). | 150 |
| Figura 56: Construção do mapa do FVC em Aracaju..... | 151 |
| Figura 57: Valores contínuos de FVC de sete estações urbanas a partir de um círculo de influência de 100 metros..... | 153 |
| Figura 58: Correlação linear entre FVC e anomalia relativa de temperatura às 16:00h referente ao período 2014-2016..... | 155 |
| Figura 59: Camada 1 - FVC em Aracaju resolução 100 x 100 metros. | 156 |
| Figura 60: Camada 2 - Espaços verdes de Aracaju com resolução de 100 x 100 metros. | 158 |
| Figura 61: Morfologia urbana de Aracaju com resolução de 100 x 100 metros. | 159 |
| Figura 62: Perfil genérico da velocidade média do vento em uma área urbana densamente ocupada e a relação com z_0 , z_d e z_H (adaptado de Oke, 2006a, p. 22). | 160 |
| Figura 63: (A) Parâmetros de entrada no cálculo de rugosidade para um grupo de construção irregular e (B) cálculo de área frontal com linhas paralelas em uma determinada direcção, adaptado de Gál e Unger (2009). | 162 |
| Figura 64: Representação espacial dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica (z_0 , z_d e z_H) em Aracaju. | 163 |
| Figura 65: Camada 3 - Rugosidade aerodinâmica e o seu efeito térmico em Aracaju. | 164 |
| Figura 66: Construção dos corredores de ventilação em Aracaju..... | 166 |
| Figura 67: Camada 4 - Corredores de ventilação e as classes indicando o seu efeito na temperatura em Aracaju. | 167 |

| | |
|--|-----|
| Figura 68: Classes de ventilação urbana em Aracaju..... | 168 |
| Figura 69: Exemplo de definição das assinaturas espectrais com base na classificação das LCZs. | 172 |
| Figura 70: Local Climate Zones de Aracaju, 2016. | 174 |
| Figura 71: Anomalias relativas de temperatura de sete LCZs em Aracaju no período de 2014-2016. | 176 |
| Figura 72: Distribuição da temperatura no dia 18-2-2016 às 1500h em Aracaju baseada na classificação das LCZ. | 177 |
| Figura 73: Redefinição das LCZ de Aracaju. | 179 |
| Figura 74: URCH de Aracaju com a resolução 100m x 100m..... | 182 |
| Figura 75: Exemplo da URCH1 | 184 |
| Figura 76: Exemplo da URCH2. | 184 |
| Figura 77: Exemplo da URCH3 | 185 |
| Figura 78: Exemplo da URCH5 | 186 |
| Figura 79: Exemplo da URCH4 | 186 |
| Figura 80: Exemplo da URCH5 | 187 |
| Figura 81: Estudos microclimáticos no centro da cidade sobre o estresse térmico e a qualidade do ar baseados nas URCH. | 189 |
| Figura 82: Fragmento do centro da cidade selecionado para a modelação microclimática com o ENVI-met. | 190 |
| Figura 83: Correlação entre a T_{ar} simulada com ENVI-met a 1.5 metros acima do solo e a T_a medida pela estação urbana Centro da Cidade a 3.5 metros acima do solo referente ao dados semi-horários no dia 18-2-2016. | 192 |
| Figura 84: T_{ar} simulada a altura de 1.5 metros acima do solo com o ENVI-met num fragmento do centro urbano de Aracaju no dia 18-2-2016 às 1500h. | 193 |
| Figura 85: UR simulada a altura de 1.5 metros acima do solo com o ENVI-met num fragmento do centro urbano de Aracaju no dia 18-2-2016 às 1500h. | 194 |
| Figura 86: v simulada a altura de 1.5 metros acima do solo com o ENVI-met num fragmento do centro urbano de Aracaju no dia 18-2-2016 às 1500h. | 194 |
| Figura 87: Visão 3D de um recorte espacial nas imediações da rodoviária no centro de Aracaju. São mostrados o cenário atual (A) e o cenário hipotético estratégico com adição de árvores nas vias (B). | 195 |
| Figura 88: Simulação comparativa da T_{ar} (à esquerda) e T_{trm} (à direita) entre o cenário atual e o cenário hipotético com adição de árvores, usando o modelo ENVI-met. | 196 |
| Figura 89: Simulações de cenários hipotéticos das concentrações de MP_{10} baseados na redução do número de automóvel nas principais vias do Mercado Municipal em Aracaju..... | 198 |
| Figura 90: Distribuição das árvores e classificação do uso do solo na área do Mercado Municipal baseado numa amostra de 3.000 pontos, usando o software I-tree Canopy..... | 200 |
| Figura 91: Presença de árvores em conexão com o corredor de ventilação urbana na avenida Ivo do Prado (Rio Sergipe à margem esquerda). | 205 |
| Figura 92: Exemplo de árvores integradas nos centros urbanos. A estratégia “caixa de plantio verde” (<i>Bespoke granite tree planters</i>) é mostrada na cidade de Derry, Irlanda. | 205 |

| | |
|---|-----|
| Figura 93: Assento público desprovido de proteção contra a T_{trm} excessiva no bairro Farolândia. | 206 |
| Figura 94: Corredor de ventilação urbana na Orla de Atalaia (mar à margem direita). | 207 |
| Figura 95: Edifícios com uma relação $W/H > 1$ no bairro Jardins. | 208 |
| Figura 96: Tráfego de automóveis e sua relação com a poluição do ar no centro da cidade. | 209 |
| Figura 97: Delimitação das áreas para as quais são definidas orientações climáticas para o ordenamento urbano. | 210 |
| Figura 98: Orientações climáticas espacializadas e ZAB prevista no PDDU de Aracaju/2015. | 214 |
| Figura 99: Orientações climáticas espacializadas e ZAP prevista no PDDU de Aracaju/2015. | 216 |
| Figura 100: Orientações climáticas espacializadas e ZAC prevista no PDDU de Aracaju/2015. | 218 |
| Figura 101: Orientações climáticas espacializadas e ZAR prevista no PDDU de Aracaju/2015. | 220 |
| Figura 102: Apresentação do clima urbano aos setores público, privado e acadêmico. | 226 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 1: Informações sobre as estações meteorológicas de superfície..... | 27 |
| Tabela 2: Estatística da ocorrência FBM no verão 2015. | 37 |
| Tabela 3: Avanço horário da FBM no interior do continente no verão 2015. ... | 40 |
| Tabela 5: Caracterização das estações urbanas e as correspondentes LCZs.... | 53 |
| Tabela 7: Objetivos do estudo, variáveis e as estações urbanas usadas. | 66 |
| Tabela 8: Estatística básica das classes de velocidade do vento em Aracaju e a correspondente intensidade média da ICU e IFU no período 2014-2016. | 78 |
| Tabela 9: Estatística básica das categorias das condições sinóticas de tempo em Aracaju e a correspondente intensidade média da ICU e da IFU durante o período 2014-2016. | 79 |
| Tabela 10: Comparação entre outras cidades referente aos valores críticos de velocidade do vento em que a ICU é desconfigurada ou anulada..... | 82 |
| Tabela 11: Comparação entre cidades ao redor do mundo da intensidade média da IFU consoante à dimensão do parque urbano..... | 83 |
| Tabela 12: Diferentes limites de valores do PET na definição das condições de sensação térmica para os diferentes tipos de clima (adaptado de Katzschner et al., 1999). | 92 |
| Tabela 13: Classes do PET, diferentes níveis de sensação térmica e respectivo estresse fisiológico nos seres humanos usados neste estudo (adaptado de Souza, 2010). | 96 |
| Tabela 14: Estatística básica dos valores do PET nos dias com FBM e nos dias sem FBM no verão 2015. | 104 |
| Tabela 15: Padrões nacionais de qualidade do ar adotados pelas cidades brasileiras, segundo o CONAMA nº3/1990. | 112 |
| Tabela 16: Critério para os episódios agudos de poluição do ar em Aracaju, segundo a ADEMA. | 113 |
| Tabela 17: Caracterização das condições meteorológicas usada nas simulações de poluentes MP ₁₀ | 125 |
| Tabela 18: Síntese dos dados e informações de entrada do modelo CAL3QHC. | 126 |
| Tabela 19: As 10 vias de circulação com as maiores concentrações de MP ₁₀ na manhã do verão 2015 baseadas no modelo CAL3QHC..... | 128 |
| Tabela 20: As 10 vias de circulação com as maiores concentrações de MP ₁₀ na noite do verão 2015, baseadas no modelo CAL3QHC. | 130 |
| Tabela 21: Escalas de planejamento e de clima urbano (adaptado de Katzschner, 2015) | 138 |
| Tabela 22: Correlação linear entre a anomalia relativa horária de temperatura e FVC no período de 2014-2016..... | 154 |
| Tabela 23: Descrição das classes de ventilação de Aracaju. | 169 |
| Tabela 24: Tipos de LCZ (Adaptado de Stewart e Oke, 2012). | 170 |
| Tabela 25: Matriz de confusão das LCZs de Aracaju | 175 |
| Tabela 26: Parâmetros climáticos das LCZ redefinidas no contexto de Aracaju. | 179 |
| Tabela 27: Descrição genérica das LCZs redefinidas em Aracaju..... | 179 |
| Tabela 28: Legenda das URCH de Aracaju. | 183 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 29: Principais dados de entrada no modelo ENVI-met..... | 191 |
| Tabela 30: Potencial benefício das árvores na remoção de poluentes MP ₁₀ em kg baseado no software I-tree Canopy | 200 |
| Tabela 31: Resumo das orientações climáticas especializadas para o ordenamento em Aracaju. Adaptado de Alcoforado et al. (2005); Lopes e Correia (2012) e Ng (2009). | 211 |

INTRODUÇÃO

1 Enquadramento do tema

1.1 No contexto da habitabilidade urbana

A cidade é o mais proeminente habitat do ser humano. Segundo o relatório da União das Nações Unidas, as perspectivas de crescimento da população mundial são significativas: mais da metade das pessoas vive em ambientes urbanos e a tendência de crescimento de aproximadamente 1,8% por ano entre 2015 e 2020, 1,6% entre 2020 e 2050, e 1,4% entre 2025 e 2030 (ONU, 2014). Na linha de crescimento populacional, a feroz urbanização particularmente nos países em desenvolvimento, aumenta a pressão sobre a utilização dos recursos naturais, intensifica a pegada das cidades sobre as questões sociais, a degradação ambiental, incluindo o combate às mudanças climáticas. O enfrentamento dessas questões é a chave para tornar as cidades inclusivas, seguras, sustentáveis e resilientes. Rees e Wackernagel (1996) provocam ao concluir que as cidades, em si, não são sustentáveis, mas são a chave para a sustentabilidade.

Nesse contexto, o conceito “habitabilidade” ganha força no momento atual em que as cidades precisam de ser sustentáveis econômica, social e ambientalmente. O termo sustentabilidade urbana significa a satisfação das necessidades da geração presente sem comprometer a capacidade de gerações futuras. A preocupação é inerente à deterioração do ambiente e dos recursos naturais e às suas consequências para o desenvolvimento econômico e social (Comissão Mundial das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, 1987, parágrafo 1 citado por Young e Hermanson, 2013). Parelamente, o termo habitabilidade urbana (*liveability city*) é melhor definido pela *Partnership for Sustainable Communities* (2009) que considera seis princípios, a saber: (1) proporcionar mais opções de transporte, (2) promover habitação equitativa e acessível, (3) reforçar a competitividade econômica, (4) apoiar as comunidades existentes, (5) coordenar e alavancar políticas e investimentos federais e (6) valorizar comunidades e bairros. Os princípios da habitabilidade urbana são interpretados na literatura como uma estratégia de ação local e centrada na comunidade (Young e Hermanson, 2013). Litman (2011) argumentou que a habitabilidade aborda o desenvolvimento econômico, a saúde pública, a equidade social e a exposição à poluição, a nível comunitário. Rue et al., (2011) concluíram que a habitabilidade pode estar

menos focada nos objetivos ambientais maiores e mais focada em fornecer estratégias específicas e detalhadas.

Examinando organizações que incorporaram a habitabilidade em suas metas estratégicas, Young e Hermanson (2013) revelaram que elas, muitas vezes, usam a sustentabilidade e a habitabilidade interdependentemente. A habitabilidade parece ser uma maneira que as comunidades estão executando seus objetivos abrangentes de política pública, mesmo se esses incluem a sustentabilidade, a qualidade de vida ou outro objetivo. Outra sutil diferença é que a cidade sustentável foca mais sobre os aspectos técnicos e científicos, enquanto a cidade habitável foca na interação entre o ser humano e a cidade.

Em suma, a cidade habitável é aquela que apresenta segurança, renda, opções de vida, cultura, transporte público e privado, igualdade e inclusão, cuidados médicos e governança, e claro o clima. A soma ponderada desses critérios, que variam ao longo do tempo, define o grau da cidade ser mais ou menos atrativa ou habitável (Schmitt, 2015). Baseado nisso, algumas cidades da Europa, Canadá e Oceania ocupam posição de destaque entre os lugares melhores condições habitáveis do mundo¹ (figura I-1).

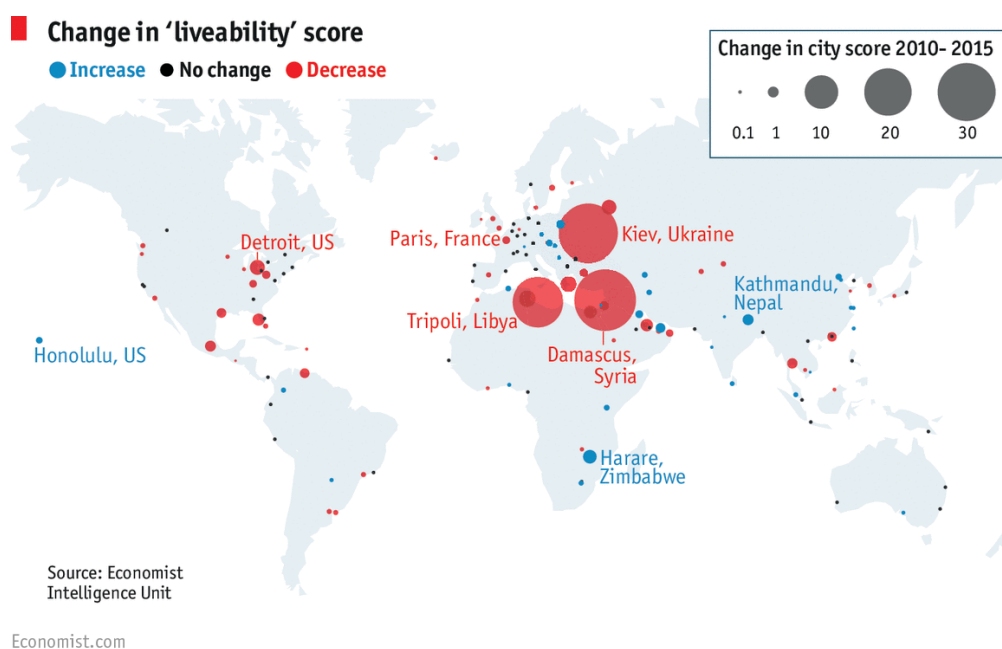


Figura I.1: Raking dos melhores e piores lugares no mundo para se viver em 2015.
 Fonte: <http://www.economist.com/blogs/graphicdetail/2015/08/daily-chart-5>, acesso em 5 de janeiro de 2017.

¹ Segundo o *Monocle's Most Livable Cities Index*, *The EIU's Liveability Ranking e Overview*, *Mercer Quality of Living Survey*, *The Global Liveable Cities Index*. Para mais informações ver <http://www.n.ethz.ch/~gkonosc/Layout/Layout.html>

Nesse sentido, o clima urbano passa a ser um critério fundamental da habitabilidade urbana. Por exemplo, quer seja a iniciativa de criar climas locais mais aprazíveis ou mesmo a iniciativa de plantio adequado de árvores nas vias pode tornar esses espaços urbanos mais atrativos para os transeuntes, pois melhora o conforto térmico humano, a qualidade do ar e entre outros benefícios ecossistêmicos das árvores. Essa ação local ou comunitária de melhorar o ambiente contribui sintomaticamente para alcance e garantia da sustentabilidade urbana.

A influência mais reconhecida e clara dos seres humanos sobre o tempo e clima é encontrado nas cidades, pois a sua forma física e a composição alteram a superfície com a qual a atmosfera interage. As alterações climáticas relevantes na cidade incluem as das propriedades radiativas, térmicas, umidade, rugosidade superficial, emissões antropogênicas de aerossóis e gases de efeito estufa. Como resultado, as cidades criam o seu próprio clima local, são sensíveis à variabilidade e mudança dos climas global e regional (Alcoforado et al., 2009b) e são vulneráveis aos eventos extremos, como as ondas de calor ou as inundações repentinas (Koppe et al., 2004).

Dentre as variações imputáveis à urbanização, a Ilha de Calor Urbana (ICU) se destaca como o fenômeno emblemático dos climas urbanos. A ICU ocorre quando as áreas urbanas experimentam temperaturas mais quentes do que seus arredores ruralizados, podendo ser encontrada nas aglomerações de variadas densidades e tamanhos (Oke, 1987). Os efeitos da ICU são muitas vezes localizados e dependem do porte da cidade e dos fatores climáticos locais, tais como vento, nebulosidade e proximidade do mar (IPCC, 2007). Como a maioria da população mundial vive nas cidades com altas temperaturas, com raras exceções, é importante entender como a ICU potencializa o aumento da temperatura e as suas consequências econômicas e sociais.

Nas cidades de clima quente e úmido próximos do equador (latitude até 15° Norte e Sul) onde as altas temperaturas (27°C em média) persistem ao longo de todo ano, as temperaturas urbanas podem ter impacto direto no conforto humano e, portanto, na saúde humana. O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - PBMC (2014) projeta os seguintes cenários de mudanças climáticas para o Nordeste brasileiro em relação a temperatura média: aumento relativamente baixo nas temperaturas entre 0,5°C e 1°C até 2040 mantendo a tendência de aquecimento entre 2 e 3°C em meados do século (2041-2070); para o final do século (2071-20100) estima-se condições de aquecimento intenso (aumento de 3°C a 4°C).

É sintomático que nenhuma das cidades brasileiras, no momento, está entre as cidades com melhores condições habitáveis do mundo (ver indicação

na nota 1). Diante desse cenário, o inevitável desafio aqui é criar e preservar espaços aprazíveis na cidade, tornando-a num ambiente de vida e trabalho mais habitável e mais acessível. Nesse sentido, o espaço construído passa a ser parte central no planejamento e projetos urbanos onde medidas que visam otimizar o conforto térmico e qualidade do ar devem ser aplicadas (VDI, 1997). Significa, por outras palavras, pensar novas maneiras de planejar e gerir as cidades. Significa, se deseja alcançar a habitabilidade urbana e garantir uma qualidade de vida dos cidadãos em sua plenitude, é preciso considerar fundamentalmente os componentes do clima urbano.

1.2 Clima urbano e planejamento

A qualidade do clima urbano passa pela criação de climas locais o mais aprazíveis possível nos espaços exteriores (e, indiretamente, no interior dos edifícios), através de um conhecimento correto dos parâmetros climáticos e sua integração nos diferentes níveis do planejamento (Alcoforado, 2010, p.139). Planejadores urbanos estão começando a analisar diferentes aspectos dos parâmetros climáticos urbanos e os incorporando aos parâmetros de planejamento. Porém, há que reconhecer o fato de, apesar do conhecimento existente sobre o clima e alguns bons exemplos de projetos climáticos (Bitan, 1992, Alcoforado et al., 2005; Ng, 2009, por exemplo), a incorporação do clima no processo de planejamento, na prática, é geralmente baixa (Oke, 1984; Eliasson, 2000).

Para Oke (1984) o planejador pode considerar o trabalho do climatologista urbano irrelevante, se esse não percebeu a natureza do problema e não conseguiu trabalhar em afinidade com ele; pode acontecer também que o climatologista ignora o processo de planejamento. Se a informação climática é relevante, mas o planeador a considera incompreensível, pode implicar a ele ter pouco contributo científico. Nessa maneira, se o planejador compreende a relevância da informação no problema, mas acha que é inaplicável, isso sugere uma falta de comunicação entre eles. Em muitos contextos específicos, a informação climática é inexistente ou nem está minimamente adequada frente aos interesses do planejamento; isso sugere igualmente que a comunicação é inexistente.

Eliasson (2000) conduziu uma pesquisa para investigar como o conhecimento sobre o clima é usado no processo de planejamento urbano. Foram realizados estudos de caso em três cidades suecas, envolvendo diferentes técnicas de entrevista e dados históricos por diferentes atores envolvidos no planejamento urbano ao nível municipal. O estudo mostrou que os planejadores urbanos estavam interessados nos aspectos climáticos, mas o uso de informações climáticas foi pouco sistemático, como resultado de várias

restrições que estão relacionadas com cinco variáveis explicativas - conceito e base de conhecimento, técnica, política, organização e o mercado. O resultado desse estudo corroborou o fato que a climatologia aplicada tem um baixo impacto no processo de planejamento.

Desses trabalhos, fica claro que o climatologista urbano necessita melhorar a comunicação com os planejadores, arquitetos e engenheiros (Oke, 2006b), os quais exigem cada vez mais informações credíveis para incorporar nos seus projetos. Sabendo disso, os climatólogos urbanos estão cada vez mais engajados a desenvolver modelos de avaliação da temperatura e qualidade do ar bem como desenvolver estratégias de avaliação dos impactos do ambiente urbano, o que tem ajudado a suprir as necessidades do planejamento urbano. Mills (2006) propôs um método conceitual que coloca o conhecimento da climatologia urbana no centro do processo de planejamento a partir da concepção de diferentes escalas, que vai dos edifícios, construção de grupos aos assentamentos. Uma distinção útil pode ser feita entre as diferentes escalas em que as decisões urbanas são implementadas e os objetivos climáticos alcançáveis em cada escala (Tabela I.1).

Tabela I-1: Objetivos e ferramentas para melhorar a qualidade do clima urbano nas diversas escalas de análise (adaptado de Mills, 2006).

| Objetivos | Impactos | Limites | | |
|--|---------------------|---|--|---|
| | | Edifícios | Grupos de edifícios | Aglomerações urbanas |
| Conforto em ambiente interno | Edifícios | Localização Materiais Projeto (e.g. forma, orientação) | Acesso à luz solar e vento Qualidade do ar | Regulamentação dos edifícios |
| Conforto em ambiente externo e saúde | Grupos de edifícios | Mudança climática local Emissões Materiais/superfícies Dimensão dos edifícios – interferência dos fluxos e áreas sombreadas. | Disposição dos edifícios Ambiente externo paisagístico, materiais e superfícies Dimensão e orientação das ruas | Orientações sobre: Densidades; Alturas; Uso do solo; e Espaços verdes |
| Uso de energia Qualidade do ar Proteção dos extremos | Aglomeração urbana | Eficiência energética Qualidade do ar Efeito do clima urbano | Modo e intensidade do fluxo de tráfego de automóveis Eficiência energética Qualidade do ar Efeito do clima urbano | Zoneamento Magnitudes e formas da política de transporte |

É necessário, portanto, uma estratégia coerente entre a aplicabilidade das ferramentas de planejamento com as escalas de interesse do planejamento (Katzschner, 2015) de modo que ações locais e comunitárias de cunho climático, na ótica da habitabilidade, possam contribuir efetivamente para a sustentabilidade urbana.

Em particular, nas cidades de clima quente e úmido a preocupação climática maior está no estresse térmico, consumo de energia e qualidade do ar (Oke, 1994, Jauregui, 1997). Portanto, mitigar esses efeitos, à luz da qualidade do clima (Bitan, 1992), é vantajoso para a saúde humana e a economia regional. Alcoforado (2006) propõe uma metodologia que “traduz” os conhecimentos sobre o clima urbano numa série de medidas para uma melhor qualidade do ambiente urbano. As diferentes fases da investigação incluem (i) aquisição de dados segundo regras precisas (ii) análise das características do clima urbano e (iii) a seleção de estratégias para o ordenamento em função da zona climática. Especialmente para as cidades com climas quente e úmido, Alcoforado e Matzarakis (2010) sugeriram as principais medidas para mitigar o estresse do calor que podem ser sumariadas em: (i) *fornecer ou maximizar a ventilação* entre e no entorno do edifícios, permitindo a entrada constante dos ventos predominantes; (ii) *reduzir a radiação solar* criando áreas sombreadas por uma combinação apropriada entre edifícios e vegetação; (iii) *reduzir a excesso de calor (carga térmica²) com os espaços verdes* através do processo de evapotranspiração que irá contribuir para a diminuição da temperatura de superfície; (iv) *minimizar o potencial perigo das inundações* e (v) *promover o arrefecimento evaporativo* que pode melhorar o conforto térmico nos espaços abertos bem ventilados.

Nos tempos atuais, os métodos de estudo do clima urbano são ordenados por fenômenos em várias escalas (Oke, 2006a) e incluem investigações observacionais com medição sistemática de campo, redes fixas, medições itinerantes, sensoriamento remoto, modelagem estatística, física e numérica (Kanda, 2006; Grimmond et al., 2010; Anjos et al., 2017). Além disso, esses estudos simulam, ao nível da atmosfera urbana, cenários climáticos presentes e futuros.

² Carga térmica nas áreas urbanas é intensificada pela conversão antrópica do solo natural em superfícies impermeáveis como o concreto e asfalto levando a alteração no balanço de radiação. A carga térmica mede a intensidade do calor armazenado e emitido de vários locais na cidade, e tem um efeito no aumento da temperatura intraurbana dependendo do volume e propriedades térmicas dos edifícios, da topografia e da disponibilidade de espaços verdes (Oke, 1980; Ng 2009).

Nos métodos e técnicas referidos, os estudos de clima urbano no Brasil têm como raiz central os preceitos do Sistema Clima Urbano teorizado por Monteiro (1976) e Monteiro e Mendonça (2003) que são desenvolvidos amplamente nos campos conforto térmico, qualidade do ar e impacto meteórico (tempestades, furacões, aguaceiros e outros) (Lombardo, 1985; Mendonça, 1997; Danni-Oliveira, 1999; Brandão, 2001; Tarifa e Azevedo, 2001;). O campo do conforto térmico tem se destacado entre os estudos do clima urbano dado às características tropicais das cidades brasileiras e à maior facilidade técnica relacionada às observações urbanas da temperatura (Mendonça, 2012) com foco maior no entendimento da ICU (Silva et al., 2016). Na região nordeste do Brasil, Zanella e Moura (2013) constataram que o predomínio de estudos focou no campo térmico na forma de episódios experimentais em campo, com escala predominantemente microclimática e com coletas horárias em pontos fixos no espaço urbano.

Não obstante a grande diversidade e a qualidade dos estudos de clima urbano no Brasil, é angustiante notar que há uma relativa falta de trabalhos voltados diretamente à aplicação dos conhecimentos climáticos na gestão e planejamento urbanos, principalmente se tiver em conta a crescente degradação da qualidade ambiental nas cidades, cujo impacto negativo na saúde humana já é uma realidade fatual. Esse contexto leva à questão inicial que é como transferir o conhecimento científico do clima em ferramentas facilmente aplicáveis ao planejamento urbano, enquadrando-se aqui a elaboração dos Mapas Climáticos Urbanos.

1.3 Aplicação dos mapas climáticos urbanos

Na perspectiva de desenvolver a base científica que permita criar ferramentas fáceis, surgem bons exemplos de sistema de classificação da paisagem urbana como os Mapas Climáticos Urbanos - MCU (Ng, 2009; Ng e Ren, 2015). Os MCUs oferecem aos planejadores (enquanto *stakeholders*) informações espacialmente úteis sobre os problemas ambientais urbanos, entre eles, a condição térmica e excesso de calor, a poluição do ar, a ventilação e, com base neles, os planejadores tomam a decisão mais correta no processo de planejamento. Esses mapas são também um método significativo de diálogo de troca de informações com os políticos e o interesse público (Baumüller, 2015).

As orientações climáticas para o ordenamento urbano definidas neste trabalho, foram produzidas no âmbito dos MCUs e, com isso, poder avançar nas questões no que toca a baixa comunicabilidade entre climatologistas e planejadores, porque esse tipo de mapa oferece a todos os agentes envolvidos no planejamento os princípios do clima urbano. Todavia, põe-se um duplo desafio: identificar os problemas e as potencialidades inerentes ao clima

urbano no contexto local e proceder à representação cartográfica das áreas com “climas especiais” ou com “resposta climática homogêna”, úteis para o ordenamento do território. Nesse aspecto, será construído o mapa com as Unidades de Resposta Climática Homogêna (URCH) vulgarmente conhecidas como os climatopos (Scherer et al., 1999; Alcoforado et al., 1999) e, baseado nessas unidades espaciais, pretende-se disponibilizar orientações climáticas para mitigar o efeito da ICU e suas consequências, melhorar as condições de ventilação e qualidade do ar de Aracaju. Baseado nas URCH, lançam-se uma série de medidas ou recomendações relevantes do clima urbano para as principais áreas de intervenção urbanística, dando especial destaque as zonas de expansão que, por suas características, necessitam de uma intervenção mais regulada, ou aquelas que carecem de proteção especial por sua função reguladora dos climas locais as áreas verdes, corpos d’água e canais de ventilação.

Os resultados empíricos produzidos nesta investigação são a base de sustentação das orientações climáticas investigadas, evitando-se assim, “generalizações simplistas a partir de esquemas teóricos gerais ou de exemplos exógenos” (Alcoforado et al., 2015, p.56-57). Nesta investigação, desenvolve-se ainda um plano de ação em que as medidas locais de mitigação e adaptação são aplicadas ao ambiente urbano em harmonia com as melhores práticas internacionais.

2 Motivação e problema em questão

No âmbito da Climatologia Urbana Aplicada, esta investigação tem como premissa o fato que Aracaju apresenta um risco ao excesso de calor e à poluição do ar relacionados à condição natural do clima (quente e úmido) e à morfologia urbana, portanto, ao clima urbano. Isto leva a questão de partida que é a seguinte:

- Existe um conhecimento científico ainda muito incipiente sobre o clima da cidade com uma fraca incorporação desse tipo de conhecimento no processo de planejamento.

No contexto da habitabilidade urbana, esta investigação pretende ser um contributo para o planejamento da cidade, através: (1) do aprofundamento de temas relacionados com os padrões térmicos locais, o stresse térmico e a poluição do ar, que têm influência direta na saúde humana e nas condições de vida e, com base nisso; (2) apresentar um plano de ação com orientações climáticas para ser aplicado no ordenamento do território.

3 Objetivos

O objetivo principal desta investigação é estudar o clima urbano de Aracaju e propor orientações climáticas para o ordenamento do território. Para isso, esta investigação tem os seguintes objetivos específicos:

- Compreender os padrões de ventos regionais focando no desenvolvimento da climatologia da frente de brisa marítima na região do Estado de Sergipe;
- Implementar uma Rede Climatológica Urbana para o fornecimento de dados meteorológicos à escala local;
- Examinar os padrões climáticos locais nomeadamente os climas locais, a ICU e a influência dos espaços verdes na temperatura (Ilha de Frescor Urbana);
- Avaliar o bioclima de Aracaju através da componente termofisiológica do conforto térmico;
- Avaliar a qualidade do ar e poluição atmosférica originária do tráfego nas principais vias de circulação da cidade;
- Elaboração da base cartográfica para o ordenamento do território, notadamente as Unidades de Resposta Climática Homogêneas (URCH);
- Propor uma série de orientações climáticas para planeamento urbano em função das URCH previamente definidas.
- Comparar as orientações climáticas espacializadas com o marcozoneamento previsto no Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano/2015 de Aracaju.

4 Estrutura da tese

Esta tese estrutura-se com uma introdução, três partes e a conclusão (Figura I.2). O objetivo da **introdução** é enquadrar a temática da investigação no contexto da qualidade de vida nas cidades. O conceito de habitabilidade foi abordado como condição necessária para a sustentabilidade do ambiente urbano bem como o papel, nesse processo, da climatologia urbana especialmente dos MCUs. Aqui, estabeleceram-se os objetivos da tese que nortearam o desenvolvimento dos capítulos como também enquandrou-se a área de estudo com destaque para a morfologia urbana e os estudos desenvolvidos e em curso sobre o clima urbano de Aracaju. Como resultado, a lógica do trabalho foi explicada pela integração às três partes de sete capítulos.

Cada capítulo tem uma estrutura própria que obedece ao seguinte esquema: introdução incluindo o estado da arte, objetivos, hipóteses, metodologia, resultados, discussão e limitações e a conclusão do capítulo.

Na **Parte I**, foram apresentados os estudos climáticos de base que consistem dos capítulos 1, 2 e 3 os quais servem de subsídio para os subsequentes capítulos. O **capítulo 1** apresentou o estudo base sobre a caracterização dos ventos regionais, focando no desenvolvimento da frente de brisa marítima e o seu impacto nas condições meteorológicas na região do Estado de Sergipe onde se localiza Aracaju. O **capítulo 2** teve como propósito a implementação de uma rede climatológica urbana, cujo objetivo é fornecer dados climatológicos que permitam avaliar os padrões térmicos locais ao longo do tempo. Essa rede seguiu princípios e conceitos definidos para as áreas urbanas, particularmente no que concerne às questões relacionadas com as escalas climáticas, à exposição dos equipamentos, à morfologia urbana e aos metadados (Oke, 2006a). Com base nessa rede, desenvolveu-se no **capítulo 3**, o estudo sobre os padrões térmicos locais incluindo a Ilha de Calor Urbano e os papel dos espaços verdes na redução da temperatura, nomeadamente a Ilha de Frescor Urbano.

A **Parte II** foi dividida nos capítulos 4 e 5 com o objetivo de fazer uma avaliação (bio)climática local. O objetivo do **capítulo 4** foi avaliar o conforto térmico em espaço aberto (*outdoor*) através do índice chamado Temperatura Fisiológica Equivalente (PET - *Physiologically Equivalent Temperature*). Esse capítulo propõe-se colocar a componente termofisiológica no centro do planejamento e na criação de espaços construídos. Na mesma direção, seguiu o **capítulo 5** cujo foco incidiu sobre a qualidade do ar. Neste, procurou-se responder a uma pergunta importante nos tempos atuais se, de fato, existe um problema de poluição do ar e a sua magnitude em Aracaju. A análise foi sustentada usando o modelo de dispersão de poluentes que estima a variação nas taxas de concentração de poluentes intraurbana, originária do tráfego de automóveis.

A **Parte III** deteve-se na construção das URCH e na sua aplicação ao ordenamento do território. As URCH oferecem aos planejadores (*stakeholders*) informações espacialmente úteis sobre as características do clima urbano e, como essas unidades climáticas dividem-se em dois tipos de mapas, optou-se por dividi-las em capítulos. Assim, no **capítulo 6** foram definidas as URCH a partir da intersecção de diferentes parâmetros climáticos relacionados com a morfologia urbana (carga térmica) e as classes de ventilação urbana. No **capítulo 7** realizaram-se dois estudos microclimáticos na área central da cidade a fim de ajudar na composição de medidas mitigadoras do estresse térmico e da poluição do ar à mesoescala. Um vez definidas as URCH,

agruparam-se medidas/orientações climáticas concretas e especializadas para o ordenamento do território, propósito do **capítulo 8**. O alvo de atenção deste capítulo foi propor orientações climáticas para mitigar o estresse térmico e a qualidade do ar, de forma a contribuir para qualidade do clima urbano. E por fim, comparou-se as orientações climáticas especializadas com o macrozoneamento estabelecido pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano/2015 de Aracaju.

Finalmente, é traçada a **conclusão** da tese, onde foram realçados os principais resultados deste trabalho, incluindo a perspectiva investigativa e os trabalhos futuros (Figura I.2).

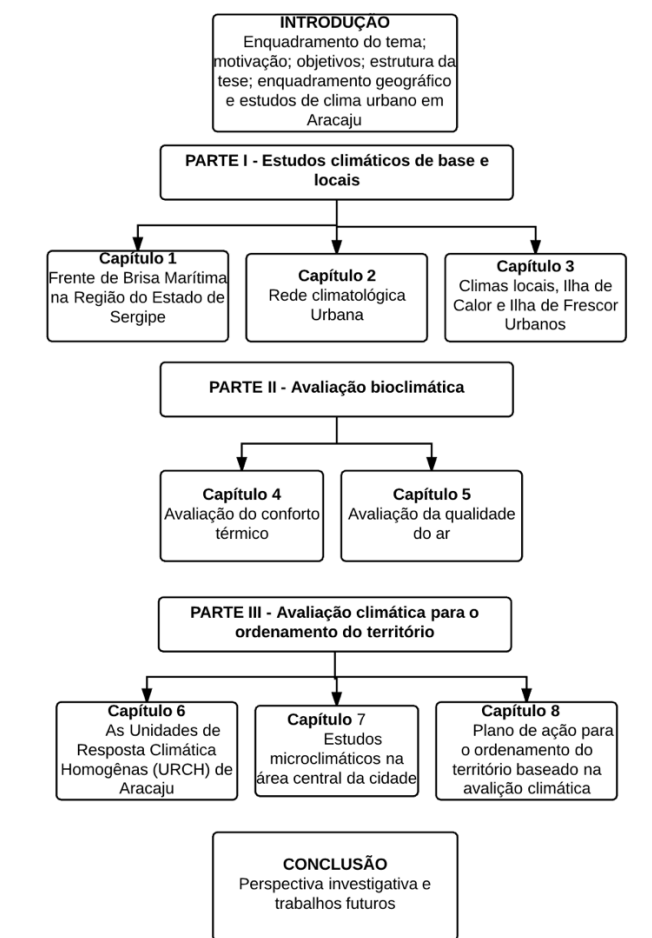


Figura I.2: Estrutura da tese e organização lógica dos capítulos.

5 Enquadramento geográfico

5.1 Área de estudo

Aracaju é uma pequena cidade situada no litoral do nordeste do Brasil, que ocupa uma área de 182 km². Está delimitada pelas coordenadas de 10° 51' e 11° 07' S e de 37° 02' e 37° 09' O e posicionada totalmente na zona

intertropical (Figura I.3). Nessa localização geográfica, são-lhe atribuídas características climáticas como verões quentes e invernos suaves.



Figura I.3: Localização geográfica de Aracaju.

As posições latitudinal e costeira expõem Aracaju a vários centros de ação e sistemas de mesoescala que explicam, em grande parte, a sua condição climática. Os ventos alísios de Leste no verão e Sudeste no inverno juntamente com sistema de brisas marítimas influenciam as condições meteorológicas na cidade.

O clima de Aracaju pode ser caracterizado como tropical e úmido correspondendo ao tipo *Am* (do tipo *monção*) na classificação climática de Köppen (Kottek et al., 2006). As médias anuais de temperatura são dos 27°C, a pluviosidade de 1.300 mm e a umidade relativa por volta dos 70% (INMET, 2016). Os altos níveis de insolação solar diários, que variam em média 5 kwh/m²/dia ao longo do ano, conferem a Aracaju um ambiente térmico naturalmente quente com característica “estressante” para o ser humano. A topografia é pouca expressiva, onde as cotas altimétricas variam entre 100 metros acima do nível do mar na parte Norte da cidade. A densa rede hidrográfica com vários córregos, rios e estuário os quais desempenham papel importante na manutenção das condições climáticas locais através da canalização dos ventos húmidos do mar e umidade relativa é uma característica marcante na paisagem urbana.

5.2 Traços da morfologia urbana

Aracaju tem uma morfologia urbana bem diversificada, considerando a densidade de construção, a geometria urbana, os espaços verdes e corpos d'água os quais “interagem” com a atmosfera urbana e, como tal, são parte do ambiente onde as pessoas vivem e trabalham. Atualmente, estima-se que residem em Aracaju mais de 640 mil habitantes, o que representa um crescimento populacional de quase 100 mil comparados com o ano de 2010 (IBGE, 2016). A densidade demográfica é elevada (média de 3 mil hab/km²) principalmente nos bairros do Centro e do Norte da cidade (Figura I.4).

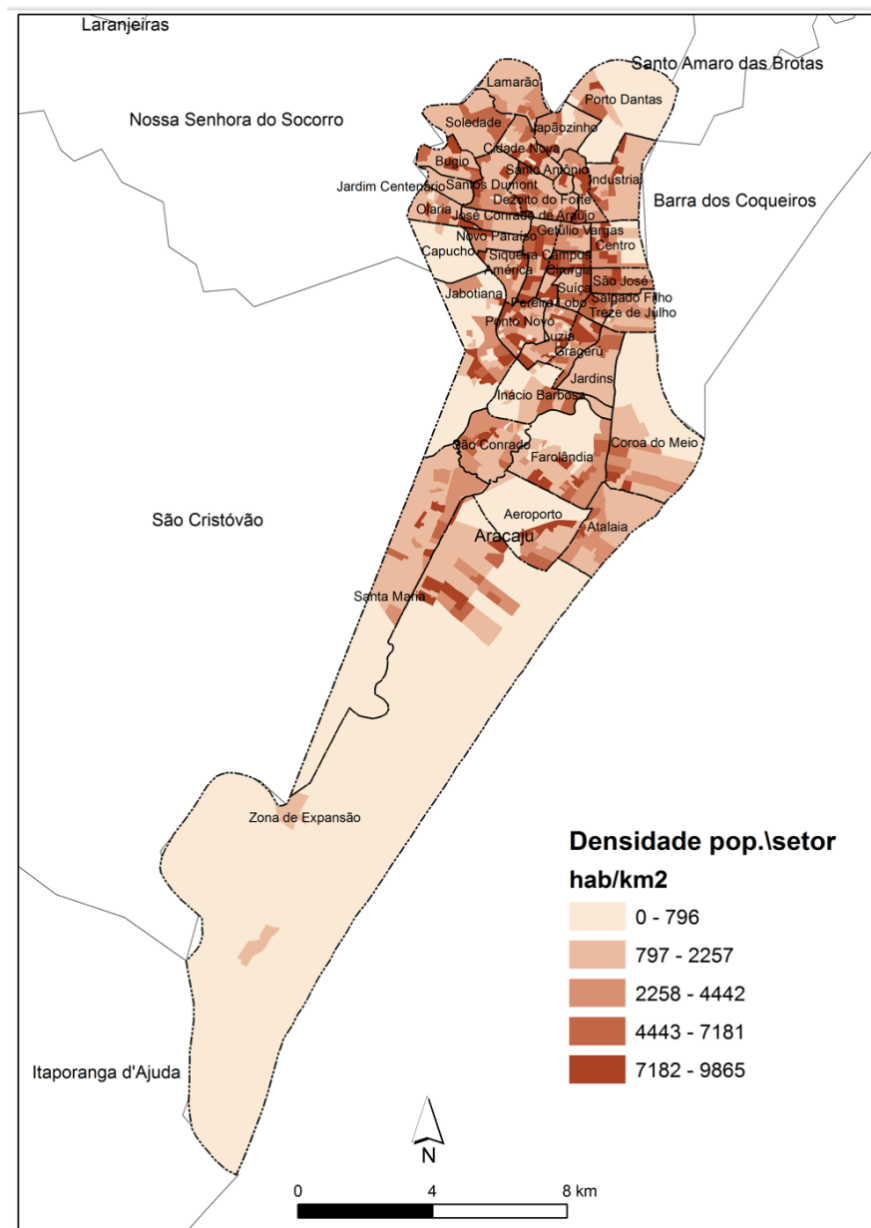


Figura I.4: Densidade populacional por setor baseado no censo do IBGE, 2010.

Os espaços urbanos são predominantemente ocupados por atividades do tipo *residências* que correspondem a uma taxa de 72.76% da área construída total, seguido pelos *serviços* com 15.80%, *comércio* com 8.09%, *outras atividades* 2.3% e a *indústria* com 1.05%³. Em termos de área construída, há uma divisão clara entre a parte Central e Norte, com taxas de ocupação elevadas e na parte Sul da cidade com taxas de ocupação baixas; na figura I.6 confirma-se a diferença na distribuição espacial do uso e ocupação do solo.

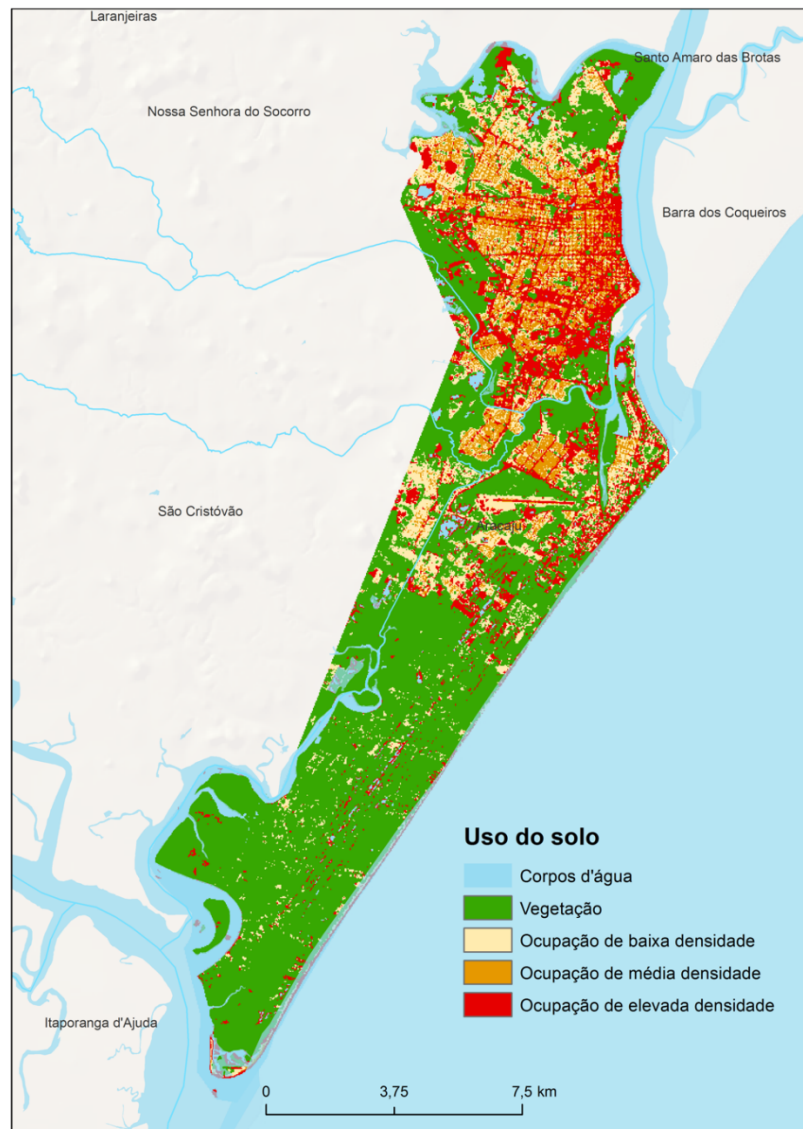


Figura I.6: Classificação do uso do solo de Aracaju com base nas respostas espectrais nos canais do visível a infra-vermelho próximo das imagens de Landsat 2/2014.
Nota: Metodologia adaptada de Lopes (2003).

³ Informação extraída do banco de dados da Prefeitura Municipal (arquivo vetor dos Lotes/2014). <http://www.aracaju.se.gov.br/> acesso em 10 de janeiro de 2016.

Ao definir as classes do tipo urbana conforme Lopes (2003), tem-se a classe *ocupação urbana de elevada densidade* (espaços urbanos em que as áreas edificadas ocupam pelo menos 50 % do total de Aracaju), ocupando uma área de 15%, seguida pela *ocupação urbana de baixa densidade* (espaços que ocupam em média 15% a 30 %do total) que corresponde a uma ocupação de 13.5% e, por fim, a *ocupação urbana de baixa densidade* (espaços que ocupam menos de 10% do total) com apenas 7.5% da área da cidade. A classe da vegetação é predominante com 55% da área ocupada. Todavia, se forem levados em conta os valores atualizados das áreas identificadas como mangue, parques urbanos, praças e vegetação arbustiva e herbácea, a proporção de área ocupada desce para 20% em virtude do desmatamento nas últimas décadas. Esses aspectos serão abordados no capítulo 6.

No que diz respeito à densidade de ocupação, o padrão de Aracaju é relativamente baixo caracteriza-se pelas edificações compactas, em média 3 pavimentos e complexo com vários edifícios altos e isolados. Na área central da cidade, é possível verificar um padrão de média densidade urbana, cuja verticalização compreende entre 5 a 9 pavimentos (Figura I.7).



Figura I.7: Vista área da morfologia urbana de Aracaju.
Fonte: <http://www.skyscrapercity.com>. Acesso em 8 dezembro 2016.

O padrão de uso e ocupação do solo que se apresenta é originário historicamente de uma sucessão de ações socioeconômicas e políticas dentro de uma lógica de produção e valorização do espaço urbano (Anjos, 2012a). Como resultado, a compreensão dos espaços sociosegregados é imprescindível para a avaliação do clima urbano, pois as resiliências do ambiente frente aos efeitos climáticos também variam de acordo com a infraestrutura socialmente criada.

Por exemplo, a estrutura residencial de alguns bairros do Norte e do Sul, caracterizada por edificações precárias pode torná-los menos resilientes ao excesso de calor.

Como se sabe, os microclimas são influenciados pelas estruturas da cidade tais como a geometria urbana, altura e volume dos edifícios, a cobertura de área construída, as superfícies permeáveis, entre outros fatores (Giovini, 1998). O padrão morfológico, tal como ele se mostra, dá sinais não só para uma inadvertida mudança climática induzida pelo aglomerado urbano, mas como essa mudança pode impactar nas condições de vida da população pelo excesso de calor e poluição do ar.

5.3 Estudos de clima urbano em Aracaju

A cidade de Aracaju tem experimentado um rápido e caótico processo de urbanização acompanhada com vários problemas ambientais e a eles, associam-se diferencialmente a vulnerabilidade aos riscos geomorfológicos (erosão e movimentos de massa) e aos riscos hidrológicos (enchentes e alagamentos) (Araújo, 2006; Araújo et al., 2010; Santos e Araújo, 2014). Nesse contexto, o impacto dos eventos pluviais extremos (chuva intensa) e a formação de risco a inundações são frequentes em Aracaju devido às imbricações entre os ritmos do clima e do desenvolvimento urbano (Brazil, 2016).

Além disso, entende-se que Aracaju apresenta o risco ao excesso de calor devido à condição natural do clima ‘estressante’ potencializado pela morfologia urbana. Desde de 2010, vários estudos têm sido endossados na compreensão do clima urbano de Aracaju especialmente na influência dos fatores urbanos e não urbanos na temperatura. A dissertação de mestrado realizada em 2012 na Universidade de Coimbra com a orientação do Prof. Dr. Nuno Ganho debruçou-se acerca da inadvertida mudança no clima imputada à urbanização (Anjos, 2012a). Estudos demonstraram em Aracaju diferenças térmicas até 7,5°C, que indicam para um maior aquecimento nas áreas centrais da cidade em relação a área periurbana e aos espaços verdes (Anjos, 2012(a) e (b), Anjos et. al., 2014(a) e (b)). O estudo de Santos (2016) no bairro Atalaia verificou um aumento da temperatura devido à expansão das áreas construídas e verticalizadas bem como à diminuição das áreas verdes. Tais estudos apontam para a existência de contrastes térmicos dentro da malha urbana, a ponto de sinalizarem intensidades da ICU igualmente expressivas. Mais recentemente, Anjos e Lopes (2017) atualizando os resultados de Anjos e Lopes (2015) demonstraram que as intensidades da ICU em Aracaju não foram notáveis como apontado em estudos anteriores. Ademais, o papel ecosistêmico dos espaços verdes tem sido alvo de estudo, considerando o seu benefício na amenização das altas temperaturas intraurbanas (Anjos, et. al., 2012b).

PARTE I: ESTUDOS CLIMÁTICOS DE BASE E LOCAIS

Capítulo 1: Frente de Brisa Marítima no Estado de Sergipe

1 Introdução

O fenômeno da brisa marítima tem sido observado em várias regiões costeiras do mundo (Yan e Anthes, 1987; Franchito et al., 1998; Freitas et al., 2007; Azorin-Molina et al., 2011; Lopes et al., 2012; Perez e Silva Dias, 2017). A estrutura e o comportamento da brisa marítima têm fascinado muitos investigadores há pelo menos cem anos (Miller et al., 2003) tornando-a um dos mais extensivamente fenômenos climáticos estudados, principalmente devido ao seu significado meteorológico nas regiões costeiras.

Como consequência, a brisa marítima é considerada um elemento climático fundamental no planejamento das cidades (Alcoforado et al., 2009; Ng, 2009). Alguns estudos têm analisado como a brisa marítima se relaciona com o efeito ICU (Acero et al., 2013; Vemado e Pereira Filho, 2015), mitigando o estresse térmico através do transporte de calor pelo um ar mais fresco e úmido (Lopes et al., 2012), outros têm estudado a brisa marítima como um mecanismo que contribui para cenários mais complexos de qualidade do ar (Miller et al., 2003; Papanastasiou et al., 2010). Neste estudo, tenta-se mostrar o impacto da brisa marítima nas condições meteorológicas na região do Estado de Sergipe a partir de uma climatologia da frente de brisa marítima.

A concepção geral é que a passagem da brisa marítima geralmente é acompanhada de um aumento da umidade do ar e de uma diminuição da temperatura que, na sequência disso, muitas áreas têm sido beneficiadas com a redução do estresse térmico. Todavia, poucos estudos têm dado atenção ao incremento de dias mais quentes relacionados com o desenvolvimento da frente de brisa. Neste estudo, dia mais quente é considerado quando as condições meteorológicas do dia analisado com eventos com frente de brisa são agravadas pelo aumento na radiação solar e temperatura do ar.

O estudo de Khan (2010) é um dos poucos que abordou essa questão. A partir da estatística de radiação solar e da temperatura do ar, Khan constatou na costa Leste e Oeste da região de Auckland – Nova Zelândia que durante os dias com brisa marítima a superfície da terra aqueceu mais a ponto de proporcionar condições para dias mais quentes.

Diferentemente do habitual, a brisa marítima é vista aqui como um fator natural que produz condições meteorológicas adversas na costa do

nordeste do Brasil, pois essa região é caracterizada por altos valores de radiação solar e altas temperaturas ao longo do ano. Uma possível mudança verificada nessas variáveis meteorológicas pode produzir efeitos significativos em termos de estresse térmico, principalmente na estação mais quente do ano. Desse modo, será questionada a ideia frequente de que a brisa marítima poderia ser um mecanismo importante para amenizar as altas temperaturas nas regiões costeiras do nordeste do Brasil.

1.1 Frente de Brisa Marítima

A brisa marítima é um sistema de célula de circulação de mesoescala formado pelo aquecimento diferencial entre a terra e o mar, onde se desenvolve um gradiente de pressão resultando na advecção do ar frio marinho sobre a terra aquecida (Atkinson, 1981; Simpson, 1994; Miller et al., 2003). O moderno conhecimento trata o sistema de brisa marítima (SBM) formado pelos seguintes componentes, segundo Miller et al., (2003): *Sea Breeze Circulation* (SBC); *Sea Breeze Gravity Current* (SBG), *Sea Breeze Front* (SBF); *Sea Breeze Head* (SBH); *Kelvin-Helmholtz Billows* (KHBs) e *Convective Internal Boundary Layer* (CIBL) (Figura 1). Não obstante, reconhecendo a grande complexidade de processos que ocorre em várias escalas espaciais e temporais do SBM, neste estudo focar-se-á na componente Frente de Brisa Marítima e para designar, por vezes, o fenômeno da brisa marítima.

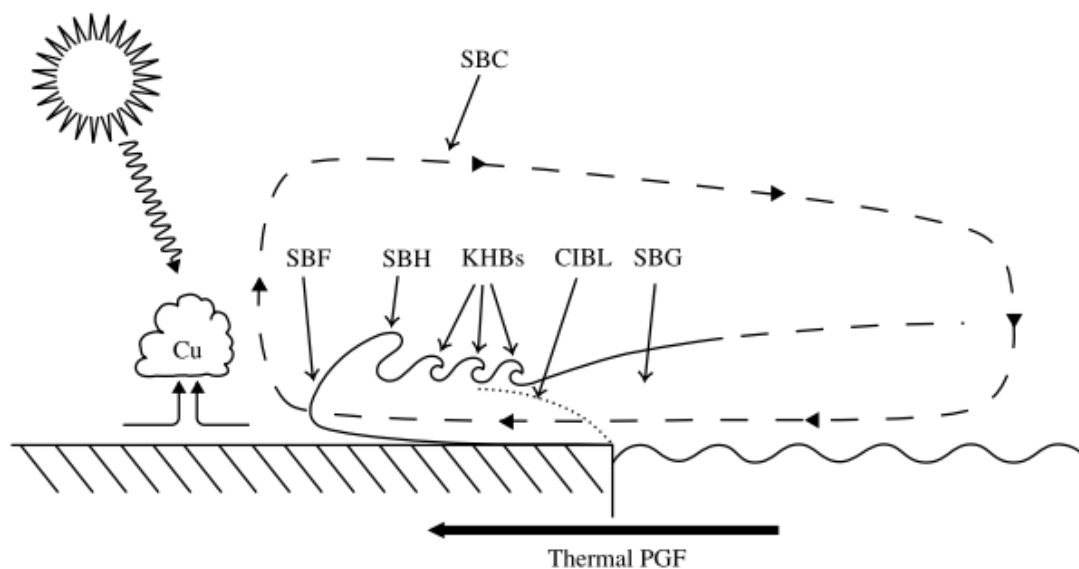


Figura 1: SBM adaptado de Miller et. al.,(2003).

A Frente de Brisa Marítima (FBM) é comumente associada à mudança brusca de temperatura, mistura, velocidade e direção do vento. A redução da temperatura e o aumento da umidade fazem o ar ascender e condensar nos

baixos níveis da atmosfera formando uma linha de nuvens (cúmulos) paralela à costa (Miller et al., 2003; Simpson, 1994). A organização espacial dessa linha de cúmulos ajuda a identificar a FBM, atrás da qual, se observa o céu claro com pouca nebulosidade.

Para que a FBM ocorra, é preciso uma convergência de controles (Miller et al., 2003) associados à geografia da área, destacando-se entre eles: a magnitude e a direção do componente de vento através da costa em escala sinótica (Artritt, 1993), os contrastes acentuados entre a temperatura do mar e a do continente (Bowers, 2004), as interações com outros sistemas de mesoescala (Damato et al., 2003), a forma da linha de costa (Simpson, 1994) e a topografia (Mahrer e Pielke 1977; Qian et al., 2012). Será transcorrido brevemente os dois primeiros controles dada a ligação com os objetivos deste estudo, enquanto as ausências dos dois últimos, são justificadas pela geografia da área de estudo na qual apresenta uma linha da costa quase retilínea e uma topografia costeira relativamente plana. Para mais informações sobre os controles na formação da FBM⁴ ver Miller et. al., (2003).

As variações da Temperatura Superficial do Mar (TSM) são cruciais para desenvolvimento da frente de brisa. No oceano é comum a queda brusca da TSM como resultado dum afloramento das águas profundas em direção à superfície. A variação espacial e temporal da TSM próximas à zona costeira são chamadas de ressurgência costeira (*coastal upwelling*) (Bowers, 2004). Segundo Miller et. al., (2003) a diminuição nos valores de TSM próxima à costa aumenta o gradiente térmico horizontal e, conseqüente, intensifica a circulação de brisa. O aumento do gradiente de temperatura (horizontal) entre o oceano e a terra foi constatado por Franchito et. al., (2008) como a principal causa da intensificação da brisa marítima na região de Cabo Frio – RJ. Porém, nessa mesma região, o estudo realizado por Ribeiro et al., (2011) investigou se haveria retroalimentação positiva entre a ressurgência costeira e a brisa marítima. A partir de um modelo acoplado atmosférico-oceânico, esses autores concluíram que a brisa marítima pode intensificar a ressurgência, mas esta não intensifica a brisa marítima, sugerindo não haver no Cabo Frio retroalimentação positiva entre esses dois fenômenos.

Clancy et al., (1979) usando um modelo numérico de interação entre a brisa marítima e a ressurgência costeira concluíram que as temperaturas frias da superfície e próximas à costa fazem confinar os fortes ventos numa camada mais superficial, produzindo assim uma FBM mais acentuada. Esses

⁴ Convém ressaltar que embora a frente de brisa e a brisa marítima são diferentes conceitualmente, ambas serão tomadas, em muitos casos, como sinônimos no presente estudo.

autores salientaram que FBM move-se mais rápida, persiste por mais tempo e penetra duas vezes mais longe no interior, nos momentos de ressurgência costeira. Usando um modelo numérico atmosférico para estudar o efeito de um gradiente de TSM na circulação atmosférica de mesoescala, Mizzi e Pielke (1984) observaram, contudo, que a ressurgência costeira não intensificou a circulação de brisa marítima. Eles argumentaram que o aumento da estabilidade e a diminuição do gradiente térmico horizontal atmosférico perto da superfície, causada por advecção de ar marinho mais fresco, justificam aquele fato. Os mesmos autores afirmaram que a escala espacial do gradiente térmico do oceano geralmente é insuficiente para ter um efeito significativo sobre o gradiente de pressão de mesoescala, pois a ressurgência costeira apresenta valores baixos de TSM numa área relativamente estreita à costa.

Nesse sentido, nota-se que, a depender da região, a influência da ressurgência costeira no desenvolvimento da frente de brisa é complexa; mas precisa ser investigada porque avalia o mais proeminente mecanismo físico para a formação da brisa marítima – o gradiente de temperatura entre o oceano e a terra. Assim sendo, neste estudo é avaliado se a FBM na região costeira do Estado de Sergipe é sensível às variações da TSM.

Se o *fluxo sinóptico* está na mesma direção que a FBM em baixo nível e não há grandes barreiras para o fluxo, ela pode progredir muito mais para o interior. Na costa Leste do Nordeste Brasileiro há um consenso de que a brisa marítima atua em conjunto com os ventos alísios e com os sistemas meteorológicos de escalas sinóticas e planetárias (Kousky, 1979; Varejão; Barreto et al., 2012). Holanda et al., (2003) mostraram que a circulação ciclônica em baixos níveis conjuntamente com os alísios, são os principais sistemas meteorológicos responsáveis pela ocorrência de brisa forte em Maceió-Alagoas. Porém, Verejão (2000) ressalta a ideia de que a brisa marítima é irrelevante na intensidade e direção do vento no nordeste do Brasil devido à persistência dos ventos alísios durante todo ano. Enquanto Barreto et al., (2002) ressalta que a confluência entre ventos alísios e a brisa marítima aumenta a velocidade do vento durante o período diurno ao longo da faixa litoral do nordeste brasileiro.

1.2 Métodos para a identificação da FBM

A característica multiescalar da brisa marítima tem levado a uma miríade de métodos, destacando-se, entre eles, a observação em superfície e as técnicas automatizadas (ou a combinação de ambas), as quais estão acessíveis à comunidade científica.

Num dos estudos mais documentados sobre o avanço da frente de brisa, Simpson et al., (1977) utilizaram estações meteorológicas, balões piloto, instrumentos planadores e observações de radar para caracterizar a brisa marítima no interior do Sul da Inglaterra. Eles foram capazes de descrever as passagens da frente de brisa pelo interior do continente durante o dia, identificando 76 frentes de brisa com uma taxa de avanço de 3ms^{-1} em cada hora e com observância até 100 km em relação à costa. Convém notar, todavia, que tal combinação de métodos não foi levada a cabo neste estudo, pois ela é extremamente dispendiosa e exigiria um grande esforço logístico (incluindo financeiro) muito para além dos objetivos deste estudo.

Outra abordagem bastante aplicada é a introdução de um método altamente automatizado envolvendo filtros e as séries de dados de temperatura, vento e pressão (Borne et al., 1998; Azorin-Molina et al., 2011; Furberg et al., 2002). Os filtros são um método seletivo para identificar dias de brisa e dia sem brisa marítima em qualquer costa, sem a necessidade de levar em conta a complexidade do terreno. Muitos filtros destacam a velocidade do vento de gradiente e a mudança rotacional da direção do vento como condições necessárias para classificar o dia como de brisa ou sem brisa. Entretanto, assumindo-se que a direção do fluxo sinóptico é a mesma da brisa marítima na região do Estado de Sergipe, o método por filtros poderia sofrer fortes ajustes, pondo em causa a eficácia do próprio método para a identificação da frente de brisa.

Nas últimas décadas, o avanço das técnicas de sensoriamento remoto tem permitido estudar a frente de brisa mais profundamente. De acordo com Bigot e Planchon (2003) o monitoramento da FBM pelo sensoriamento remoto é útil para demarcar e localizar a sua posição geográfica e, indirectamente a estimar a força e persistência desse fenômeno. Com o uso da imagem de satélite, por exemplo, é possível ter uma potencial assinatura da frente de brisa onde, sobre as imagens, observa uma linha de nuvem (cúmulos) paralela à costa (Damato et al., 2003; Planchon et al., 2006). Através do movimento progressivo das nuvens ou linhas de cúmulos e mesmo nas condições onde os ventos de brisa e os alísios se mesclam, é possível estudar além do avanço no interior do continente o comportamento diário (início, duração e decadência) da FBM.

Damato et al., (2003) usaram imagens visíveis do *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) para identificar a frente de brisa na área do Canal da Mancha. Esses autores demonstraram que a frente de brisa avançou no continente entre 10 a 50km no período entre maio a setembro de 2000, em consequência da topografia, da exposição da costa e das situações meteorológicas. Baseando nas imagens de satélite, os autores citados

observaram que o maior desenvolvimento da frente de brisa esteve associado à posição do Anticiclone do Norte da Europa. Planchon et al., (2006) demonstraram que o sensoriamento remoto pode ser uma importante técnica para detectar a frente de brisa. Usando refletâncias das imagens do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), esses autores observaram uma maior ocorrência da frente de brisa na região do Norte-Nordeste do Brasil durante a estação quente de 2000 (setembro – dezembro). Os resultados confirmam que a frente de brisa avançou a distâncias entre 40 a 100 km em relação à costa, atribuídas a uma maior diferença de temperatura entre a terra e o mar e a uma maior exposição da costa aos ventos alísios.

De fato, os métodos de sensoriamento remoto têm a vantagem de identificar e espacializar melhor a frente de brisa. Porém, eles são subjetivos e não incluem eventos de brisa quando a fronteira de nuvens paralela à costa está ausente ou desconfigurada sobre a imagem de satélite. Até ao momento, as imagens de satélite utilizadas na identificação da FBM limitaram-se a uma pequena amostra de imagens, geralmente a uma hora específica do dia. Isso impossibilita a construção duma climatologia da frente de brisa que contenha seu comportamento diário, o que é fundamental para avaliar o impacto desse fenômeno nas condições meteorológicas em qualquer região. Além disso, esse tipo de climatologia serve de suporte para aplicação do conhecimento FBM no planejamento das cidades costeiras.

2 Objetivos

Os objetivos deste capítulo são: (1) caracterizar os ventos regionais, (2) identificar e caracterizar o comportamento da FBM na região do Estado de Sergipe e, com base nisso, (3) explorar a relação entre a FBM e as condições meteorológicas locais.

Uma vez alcançados os objetivos, algumas hipóteses serão deduzidas:

- De fato, a FBM existe e é expressiva no Estado de Sergipe (e Aracaju)?
- A FBM tem um impacto negativo nas condições meteorológicas a ponto de estar relacionada com dias mais quentes na região do Estado de Sergipe?

3 Materiais e métodos

3.1 Área de estudo

Dado o carácter mesoescalar da brisa marítima, foi selecionada a região do Estado de Sergipe localizada na costa leste do nordeste do Brasil que tem os limites - ao Oeste, o oceano Atlântico, os estados da Bahia ao Sul-Sudoeste e Alagoas ao Norte. O Estado de Sergipe ocupa uma área de 21.910 km² e um possui um litoral com extensão de 163 km que corresponde a 2.2% de toda a costa do nordeste brasileiro. Sua população é de 2.22 milhões de habitantes (IBGE, 2014). A topografia varia entre 0 a 1000 metros acima do nível do mar, a forma da linha da costa é retilínea, o que expõe a área de estudo à ação dos ventos alísios vindos do oceano e, portanto, favorece a penetração da FBM no interior da área de estudo (Figura 2).

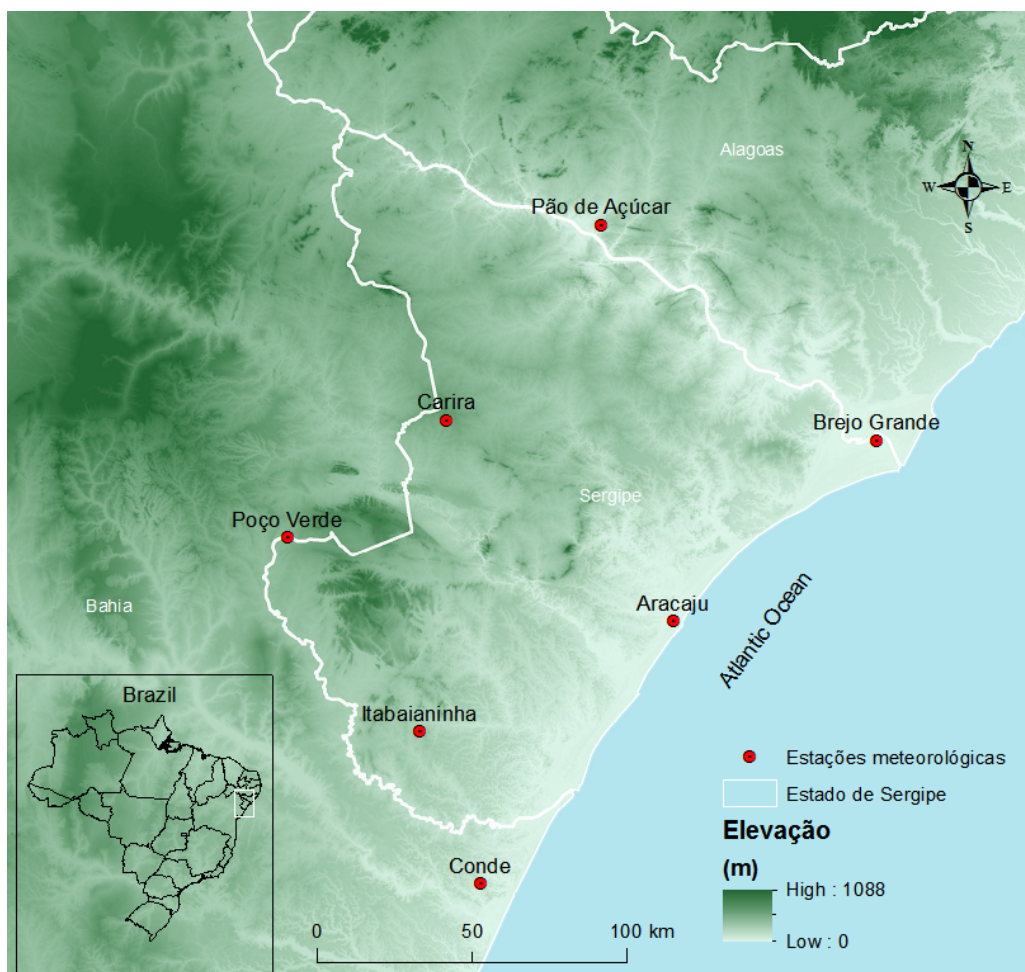


Figura 2: Localização geográfica das estações meteorológicas de superfície (Google Earth, 2016).

O clima do Estado de Sergipe caracteriza-se por apresentar verões quentes e invernos suaves. Segundo a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2014) a maior parte da área está sob o domínio do clima *As* (clima tropical quente e úmido, com estação seca no verão) caracterizado pela temperatura média do mês mais frio do ano $> 18^{\circ}\text{C}$, e, ao noroeste, encontra-se um clima mais severo nomeadamente o semiárido do sertão do tipo *Bsh* (baixa latitude e altitude) caracterizado por altas temperaturas, baixa umidade e irregularidades nos regimes das chuvas. Assim, a média anual da temperatura varia entre 24°C a 26°C , a umidade relativa entre 45 a 70%, e a pluviosidade entre 520 mm a 1400 mm (INMET, 2016). De acordo com o Atlas Solamétrico do Brasil, o Estado Sergipe é uma das regiões com o maior índice de radiação solar com a média anual que chega até $18 \text{ MJ m}^{-2}.\text{dia}$. Nesse contexto, a área de estudo ganha interesse com estudo da FBM uma vez a condição do estresse térmico é sensível à mudança daquelas variáveis meteorológicas especialmente durante a época mais quente do ano.

O Estado de Sergipe está submetido à atuação de vários sistemas atmosféricos de macroescala e mesoescala designadamente os Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Açores, aos quais se associam os ventos alísios de Sudeste e os alísios de Nordeste. Além disso, são frequentes os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) que normalmente atuam nos meses mais quentes do ano com o tempo de vida médio que varia de 4 a 11 dias (Ferreira et al., 2009). A simetria (localização e movimento) desses vórtices influencia o padrão de nebulosidade na região nordeste do Brasil (Kousky, 1981). Assim, portanto, os sistemas atmosféricos e os ventos alísios influenciam fortemente a identificação da linha de cúmulos associada a FBM e o respectivo significado meteorológico que é-lhe atribuída.

3.2 Conjunto de dados

Foram usados dados meteorológicos de sete estações meteorológicas automáticas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia/INMET referentes ao período entre 1 de Dezembro de 2014 e 31 de março de 2015 (doravante referenciado como verão 2015). Neste estudo, todas as estações meteorológicas usadas refletem os padrões de vento prevalentes e especialmente o comportamento da brisa marítima na região. As informações referentes à localização, topografia, distâncias em relação ao mar e ao período de análise dos dados para todas as estações meteorológicas são mostradas na Figura 2 e sintetizadas na Tabela 1.

No que se refere à caracterização dos ventos oceânicos adjacentes, foram usados dados relativos à estimação espacial da direção e velocidade dos ventos. Esses dados são do *Climatology of Global Ocean Winds* (COGOW) derivados

dos sensores a bordo do satélite QuikSCAT (*Quick Scatterometer*) com resolução de 25km e disponíveis em grade de $0.2^\circ \times 0.2^\circ$, cuja estatística dos ventos baseia-se no período de 2000 a 2009 (Craig et. al., 2006).

Tabela 1: Informações sobre as estações meteorológicas de superfície.

| Estações meteorológicas | Localização Geográfica | | | | Período de análise | |
|-------------------------|------------------------|---------------|--------------|-------------------------------|--------------------------------|---|
| | Latitude | Longitude | Altitude (m) | Dist. transversal ao mar (km) | Estudo da FBM (Dados horários) | Estudo dos ventos regionais (Dados mensais) |
| Aracaju | 10°57'9.97"S | 37° 3'15.15"W | 4 | 3 | 01.12.2014 - 31.04.2015 | 2014-2017 |
| Brejo Grande | 10°25'39.70"S | 36°28'5.29"W | 6 | 11 | 01.12.2014 - 31.04.2015 | 2014-2017 |
| Carira | 10°22'4.99"S | 37°42'52.18"W | 290 | 99 | 01.12.2014 - 31.04.2015 | 2014-2017 |
| Conde | 11°42'52.49"S | 37°37'2.91"W | 5 | 11 | 01.12.2014 - 31.04.2015 | 2014-2017 |
| Itabaianinha | 11°16'22.63"S | 37°47'38.44"W | 205 | 54 | 01.12.2014 - 31.04.2015 | 2010-2014 |
| Pão de Açúcar | 9°48'0.63"S | 37°15'59.52"W | 21 | 122 | 01.12.2014 - 31.04.2015 | 2014-2017 |
| Poço Verde | 10°42'33.05"S | 38°10'33.92"W | 367 | 120 | 01.12.2014 - 31.04.2015 | 2014-2017 |

3.3 Método para identificar a FBM

Adapato de Damato et. al., (2003) e Planchon et. al., (2006), o método de identificação da FBM usado neste estudo seguiu cinco passos, como mostra a Figura 3.

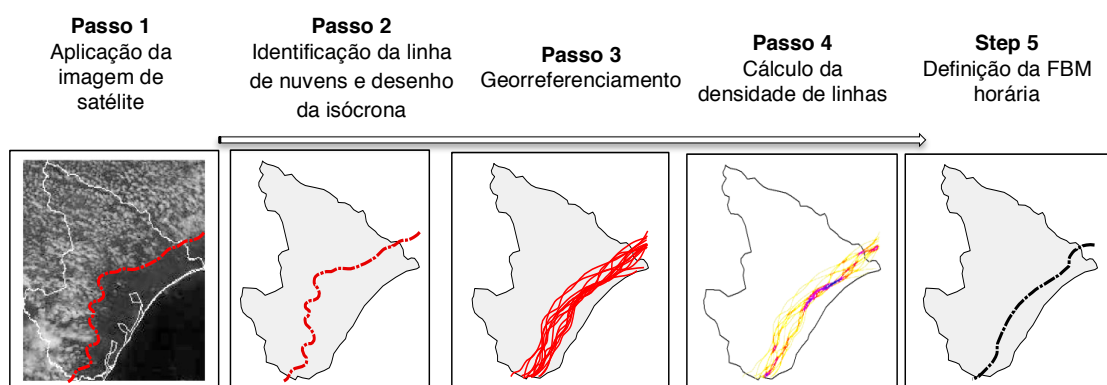


Figura 3: Método para identificar a FBM.

Nota: Base cartográfica do Região de Sergipe (SRH, 2014).

Passo 1: Aplicação da imagem de satélite. Foram usadas as imagens de satélite GOES-13 referente ao nordeste do Brasil no canal 1 visível, comprimento de onda entre 0.55 and 0.75 μm e resolução espacial de 1km fornecidas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos-

CPTEC/INPE. A imagem GOES-13 tem diferenças de cor espectral bem marcadas entre as nuvens de baixo nível (cúmulos) e as características da superfície da terra-mar, o que permite, ao introduzi-las em ambiente SIG (ARCGIS), delinear a linha de nuvens cúmulos associada a FBM. Esse tipo de imagens GOES foi testado, com sucesso, por Planchon et al. (2006) para a região Norte- Nordeste do Brasil. Todavia, é de salientar, que a FBM não está sempre associada à linha de cúmulos, se a umidade está muito baixa, a linha de nuvens não é visível pelas condições radiométrica do sensoriamento remoto (Bigot e Planchon, 2003). Segundo Panchon et al., (2006) essas limitações subjetivas ocorrem em condições (1) sinoticamente perturbadas com linhas largas e desconfugas de nuvens não associadas às frentes de brisas ou (2) com céu sem nuvens sobre a imagem usada. Neste estudo, foram examinadas sequencialmente 847 imagens GOES-13 horárias entre as 1100h e as 2100h (UTC) referente ao verão 2015. Nessa época do ano, é esperado que o gradiente térmico entre a terra e o mar esteja mais evidenciado o que favorece à formação e ao desenvolvimento da FBM.

Passo 2: Identificação da linha de nuvens e desenho da isócrona. Dentro do ambiente SIG, cada imagem GOES-13 foi importada para o software Feature Analyst. Essa ferramenta é útil principalmente para as imagens cuja identificação das nuvens a olho nu é impossível, isto é, quando se fizeram presentes as condições indicadas no item (ii) do passo 1. Além disso, com o uso da função “*bach*” embutida nessa ferramenta, um grande conjunto de imagens pode ser processado simultaneamente para a exportação do vetor que corresponde ao amontoado de nuvens. A FBM foi definida manualmente e desenhada sobre cada imagem (digitalização em ecrã - *onscreen digitising*), considerando a linha de nuvens paralela à costa, similar ao procedimento usado por Planchon et al., (2006). O resultado foi outro arquivo vetor representado por uma isócrona referente a hora da presença da FBM.

Passo 3: Georreferenciamento. Este passo é condição essencial para uma espacialização da FBM sobre o mapa, de modo a mensurar adequadamente o seu avanço no interior do continente. Aqui, todos os vetores criados no passo 2 foram georreferenciados no sistema de coordenadas (Datum America do Sul/ Zona 24 e projeção Transversal de Mercator) e plotados sobre o mapa do Estado de Sergipe. Em seguida, todos os vetores georreferenciados em forma de linhas são reconvertidos em arquivo grid.

Passo 4: Cálculo da densidade de linhas. Baseado nos arquivos grid previamente gerados, o algoritmo *Kernel Density Estimates* embutido no ARCGIS foi usado para calcular a densidade de linhas que representa alta frequência da passagem da FBM sobre uma dada área no mapa. O processo de

desenhar sobre cada raster (passo 2) foi repetido para gerar um vetor que corresponderá a média horária específica da passagem da FBM.

Passo 5: Definição da FBM horária. O arquivo vetor final foi considerado como uma isócrona que representa a passagem da FBM numa hora específica do dia.

3.4 Climatologia da frente de brisa-SE

Partindo dos eventos de FBM identificados pelo referido método, foi elaborada a estatística da FBM nos seguintes termos:

- I. *Início* (unidade - hora): é definido como a hora em que uma linha de nuvens é observada sobre a imagem na parte continental da área de estudo. O início da frente de brisa foi considerado se a direção do vento está entre o quadrante 30° e 150° (Nordeste – Sudeste).
- II. *Decadência* (hora): é definida como a hora em que a linha de nuvens desaparece sobre a imagem geralmente distante da linha de costa e próximo ao pôr-do-sol.
- III. *Duração* (hora): período de tempo definido entre o *início* e a *decadência*;
- IV. *Força* (ms^{-1}): definida como a magnitude do avanço horizontal da FBM expressada pela velocidade do vento. Para o cálculo da *força* foram usados os dados horários de velocidade do vento das estações meteorológicas que estão sob o domínio da FBM num momento exato da sua passagem. À medida que a frente de brisa ou a linha de nuvens avança sobre o continente, outras estações meteorológicas foram incluídas sucessivamente no cálculo da *força*. A espacialização da FBM sobre o mapa ajuda a identificar quais são estações meteorológicas e em que momento devem ser incluídas nesse cálculo. A introdução sucessiva das estações meteorológicas para definir a *força* tem como hipótese o fato que a FBM avança sobre o continente numa mesma direção conforme definido no estágio de *início*.
- V. *Avanço no interior do continente* (km): extensão máxima da FBM pelo interior do continente baseada numa linha observacional projetada partir da costa de Aracaju.
- VI. *Classificação dos dias com FBM*: a primeira tarefa foi eliminar obviamente os dias de eventos sinóticos que não permitem identificar, sobre a imagem de satélite, a linha de nuvens característica da FBM (*Passo 1: Aplicação de imagens de satélite*). Segundo, assumiu-se como dia com brisa o exemplo mostrado na Figura 4 (a). A bem demarcada linha de cúmulos presente na imagem GOES-13 com cor branca e

brilhante e vista paralela à costa é uma potencial assinatura da FBM (Simpson, 1994; Planchon, et. al, 2006). Esse tipo de assinatura mostra geralmente céu claro no lado costeiro imediatamente após a passagem da FBM. Considerou-se como *dia com FBM* uma vez alcançados os estágios de *início* e *decadência*. A Figura 4 (b) mostra um exemplo de atuação de um sistema sinóptico sobre a imagem onde vê-se alta concentração e descontínua de nuvens cúmulos, enquanto a Figura 4 (c) mostra céu claro sem presença de nuvens. Essas situações foram rejeitadas como possíveis *dias com FBM*.

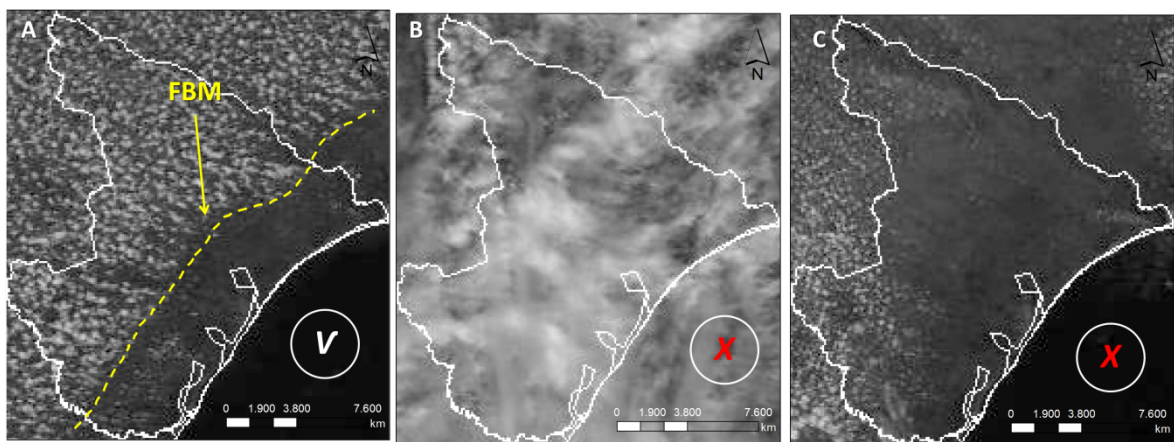


Figura 4: Recorte das imagens de satélite GOES-13 do canal visível com resolução de 1km sobre o Estado de Sergipe.

Nota: São apresentadas três situações típicas às 16:00 UTC: (a) linha de nuvens característica da FBM no dia 03-01-2015, (b) amontoado de nuvens não associado à FBM no dia 15-12-2014 e (c) céu claro sem presença de nuvens no dia 28-03-2015.

A diferença entre dia com brisa e dia sem brisa no Estado de Sergipe é influenciada pelas características de circulação atmosférica e especial dos sistemas sinópticos do Nordeste do Brasil os quais geralmente duram ao longo de dias e semanas. Para caracterizar as condições sinópticas durante o período de estudo, usaram-se imagens do satélite GOES-13 no canal 4 (infravermelho IV) e cartas sinópticas da América do Sul ao nível de superfície (1000 hPa) e a 850 hPa fornecidas pelo CPETEC/INPE, ambas às 24h (00:00h –UTC) para os *dias com FBM* e os *dias sem FBM*. Nesta classificação, complementa-se com a análise da influência da TSM na FBM, utilizando-se dos dados diários relativos à TSM extraídos das imagens de satélite da NOAA / NASA *Pathfinder Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) high quality Dataset*.

Sequencialmente, a avaliação estatística da FBM foi realizada com base:

- I. Na ocorrência horária e mensal da FBM;
- II. Na definição do ciclo diário da FBM através do *início, duração, força e decadência*;
- III. Na frequência espaciotemporal da passagem horária e mensal da FBM;
- IV. No cálculo do avanço horário e mensal da FBM no interior do continente;
- V. No cálculo dos *dias com FBM* e *dias sem FBM*.

A análise deste estudo completa-se com a relação entre a FBM e as condições meteorológicas na região do Estado de Sergipe que foi explorada comparando seis variáveis meteorológicas (velocidade do vento, direção do vento, temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e radiação solar) com os *dias com FBM* e os *dias sem FBM* referente ao verão 2015.

4 Resultados

4.1 Padrões dos ventos regionais

O padrão de circulação atmosférica no setor do Oceano Atlântico Sul oriental (centrado sobre 0-40°S e 0-60°W) foi analisado pelas médias dos vetores de direção e velocidade do vento medidos a partir do satélite QuikSCAT. As médias compostas dos ventos foram espacializadas nos mapas e acopladas em rosa-dos-ventos sazonalmente no período de 2000-2009. Os dados são bastantes elucidativos, ao indicar que, na segunda quinzena de fevereiro (verão), o vento do quadrante Leste supera mais que 50% da frequência com uma velocidade média de 6.2 ms^{-1} (12 nós no mapa) e chega a atingir 35% com 8.2 ms^{-1} (16 nós) em outubro (primavera); enquanto na segunda quinzena de Julho (inverno), quase a totalidade da ocorrência (92%) foi de ventos de Sudeste com velocidades de 8.2 ms^{-1} (Figura 5 a,b,c).

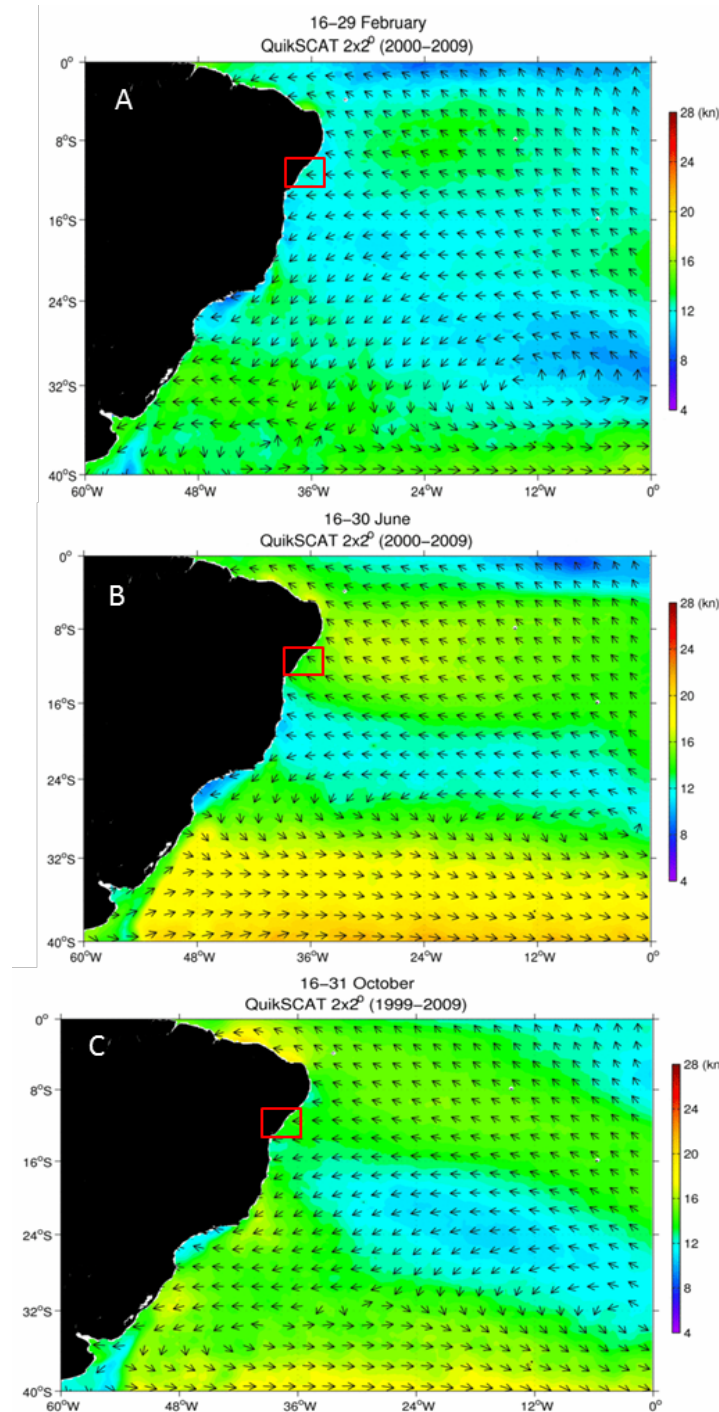


Figura 5: Climatologia média escalar da velocidade do vento espacializadas na parte Oeste do Atlântico Sul.

NOTA: São mostrados os mapas de direcção e velocidade do vento (1 knot = 1.17 mile/h = 1.88 km/h = 0.51 m/s) para os meses de Fevereiro (a), Julho (b) e Agosto (c) no período de 2000-2009. A área corresponde ao oceano Atlântico, grade $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ e centrada $0-40^\circ\text{S}$ latitude e $0-60^\circ\text{W}$. O retângulo vermelho sobre os mapas corresponde a área onde está localizada o Estado de Sergipe. Os dados foram coletados no site da *Climatology of Global Ocean Winds* (COGOW) (<http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow>), e fornecidos cordialmente pelo *Oregon State University Cooperative Institute for Oceanographic Satellite Studies* (CIOSS) (<http://cioss.coas.oregonstate.edu>, acedido em 15 de Abril de 2015).

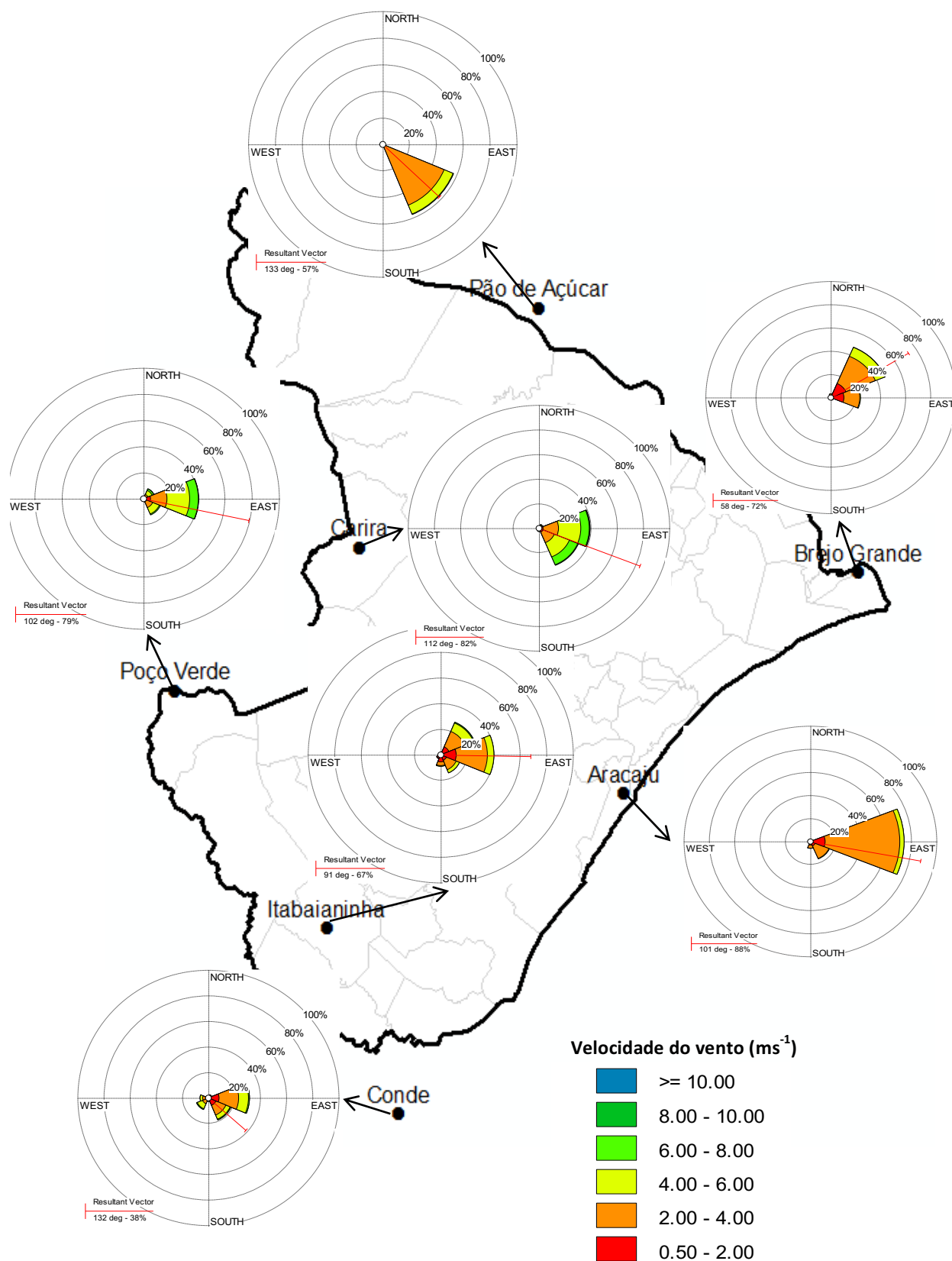


Figura 6: Frequência da velocidade e direção do vento (média diária) de sete estações meteorológicas de superfície referente ao período 2014-2017.

Quanto aos ventos à superfície terrestre, observa-se o predomínio da direção entre nordeste a sudeste em praticamente todas as setes estações analisadas no período 2014-2017 (Figura 6). As frequências das velocidades médias dos ventos, contudo, apresentaram-se diferenciadas devido à topografia e à distância em relação à costa. Em Aracaju, registrou-se as maiores frequências (74%) das velocidades dos ventos na classe entre $2 - 4 \text{ ms}^{-1}$, na qual Brejo Grande registrou 40%, tendo na classe $0.5 - 2 \text{ ms}^{-1}$ 29% e na classe calma (até 0.5 ms^{-1}) 21% das ocorrências, seguido de Conde que registou 31%, 21% e 20%, respectivamente. No centro da área estudo, Itabaianinha teve maioria da velocidade dos ventos na classe entre $2 - 4 \text{ ms}^{-1}$ com 48%, na classe $0.5 - 2 \text{ ms}^{-1}$ com 35% e 15% na classe $4 - 6 \text{ ms}^{-1}$. Mais ao interior, Carira registrou as maiores frequências (31%) na classe $4 - 6 \text{ ms}^{-1}$ e acusando 13% na classe $6 - 8 \text{ ms}^{-1}$, embora a classe calma foi expressiva com 20% dos casos, enquanto Poço Verde seguiu com as frequências de 34% na classe calma, $4 - 6 \text{ ms}^{-1}$ com 26%, $2 - 4 \text{ ms}^{-1}$ com 20% e 8% na classe $6 - 8 \text{ ms}^{-1}$. Mais a norte da área de estudo, Pão de Açúcar registou 51% das velocidades dos ventos concentradas na classe $2 - 4 \text{ ms}^{-1}$ em contraste com apenas 7% na classe $4 - 6 \text{ ms}^{-1}$ (Figura 6).

4.2 Análise das condições sinóticas e das TSM

A análise sinótica para um típico *dia com FBM* e um *dia sem FBM* é ilustrada na Figura 7. Nesta, observa-se, ao nível de superfície, a presença semipermanente do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) posicionado a Leste de 35°W (Figura 7 (a)). Observa-se ao nível de 850 hPa a presença do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCANs) sobre o Estado de Sergipe (Figura 7(b)). A simetria (localização e movimento) do ASAS e VCANs pode produzir situações de estabilidade atmosférica caracterizada por céu claro que favorece a formação de nebulosidade típica da FBM como pode ser vista na Figura 7 (c). Em contrapartida, observa-se na Figura 7 (f) que a área de estudo está posicionada na periferia de um VCAN onde a linha de cúmulos dissocia-se devido à instabilidade atmosférica.

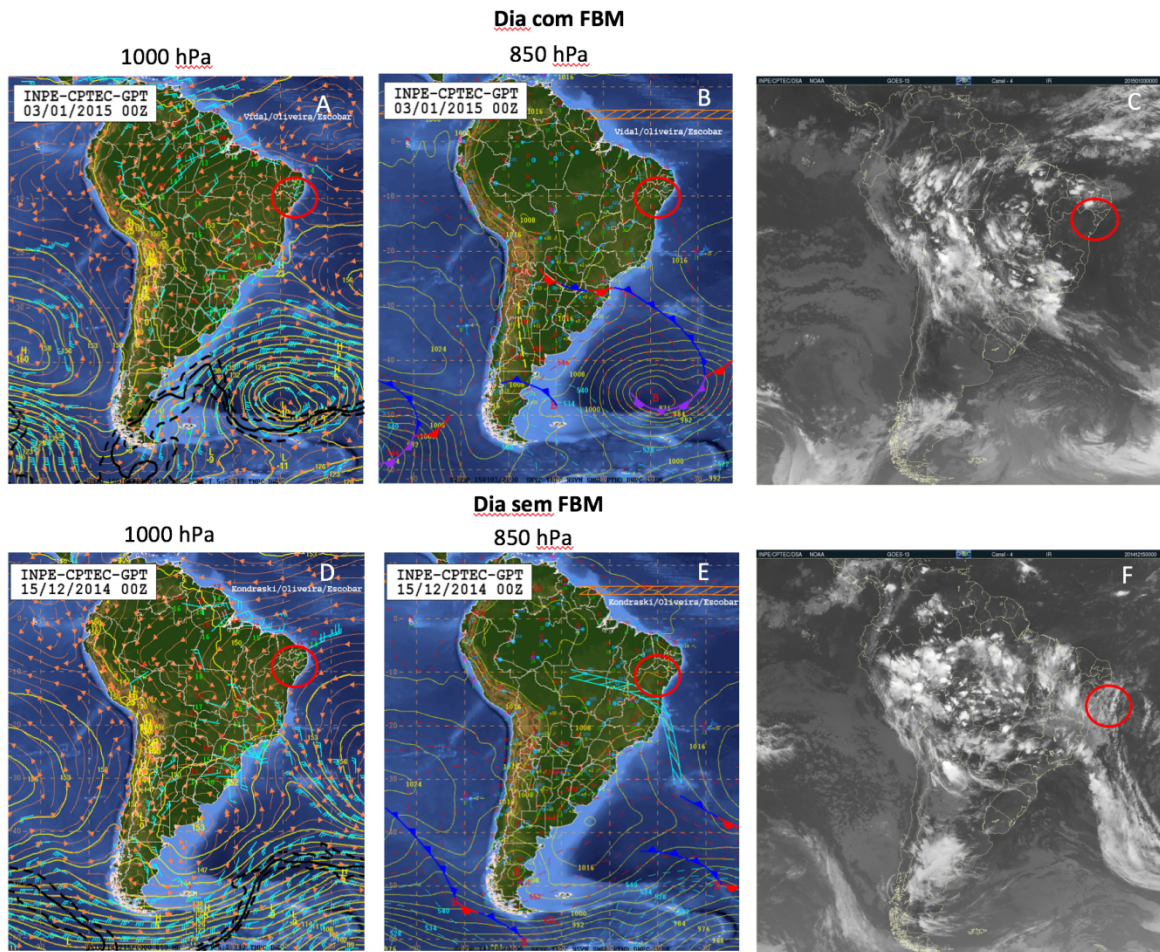


Figura 7: Situações sinóticas sobre América do Sul no dia com FBM (03/01/2015) e no dia sem FBM (15/12/2014).

Nota: são mostradas as cartas sinóticas de superfície 1000 hPa (A) e (D), à 850 hPa (B) e (E) bem como as imagens de satélite GOES-13 do canal 4 (infravermelho IV) todas às 0000 UTC e fornecidas pelo CPTEC/INPE. É possível perceber a localização do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis nas imagens de satélite C e F produzindo, respectivamente, bons tempos com céu claro durante dia com brisa e tempos instáveis com elevada nebulosidade no Atlântico Sul em especial no Nordeste do Brasil.

As variações de TSM a partir do satélite AVHRR para os *dias com FBM* *sem FBM* na região oceânica adjacente ao nordeste do Brasil são ilustradas na Figura 8. O conjunto de imagens mostra um gradiente térmico nas águas oceânicas onde as maiores TSM são observadas próximas à costa. A TSM variou regularmente com a mínima de 23.7°C e a máxima de 30°C para os *dias com FBM* e mínima de 23.4°C e a máxima de 30°C para os *dias sem FBM*. A variação na TSM é importante para a formação do gradiente térmico e, consequentemente intensifica a formação da FBM. Porém, no *dia com FBM* em 6 de Fevereiro (Figura 8 (d)) e no *dia sem FBM* em 7 de Fevereiro de 2015 (Figura 8 (e)) as TSM estiveram mais frias. Por outro lado, é notável uma diminuição da TSM próximo à costa de Sergipe e, estendendo para a costa de Alagoas, cuja TSM média foi de 26°C ocorrendo tanto nos *dias com FBM* como

nos *dias sem FBM*. Esses resultados indicam que a FBM não é sensível às variações da TSM nessa região.

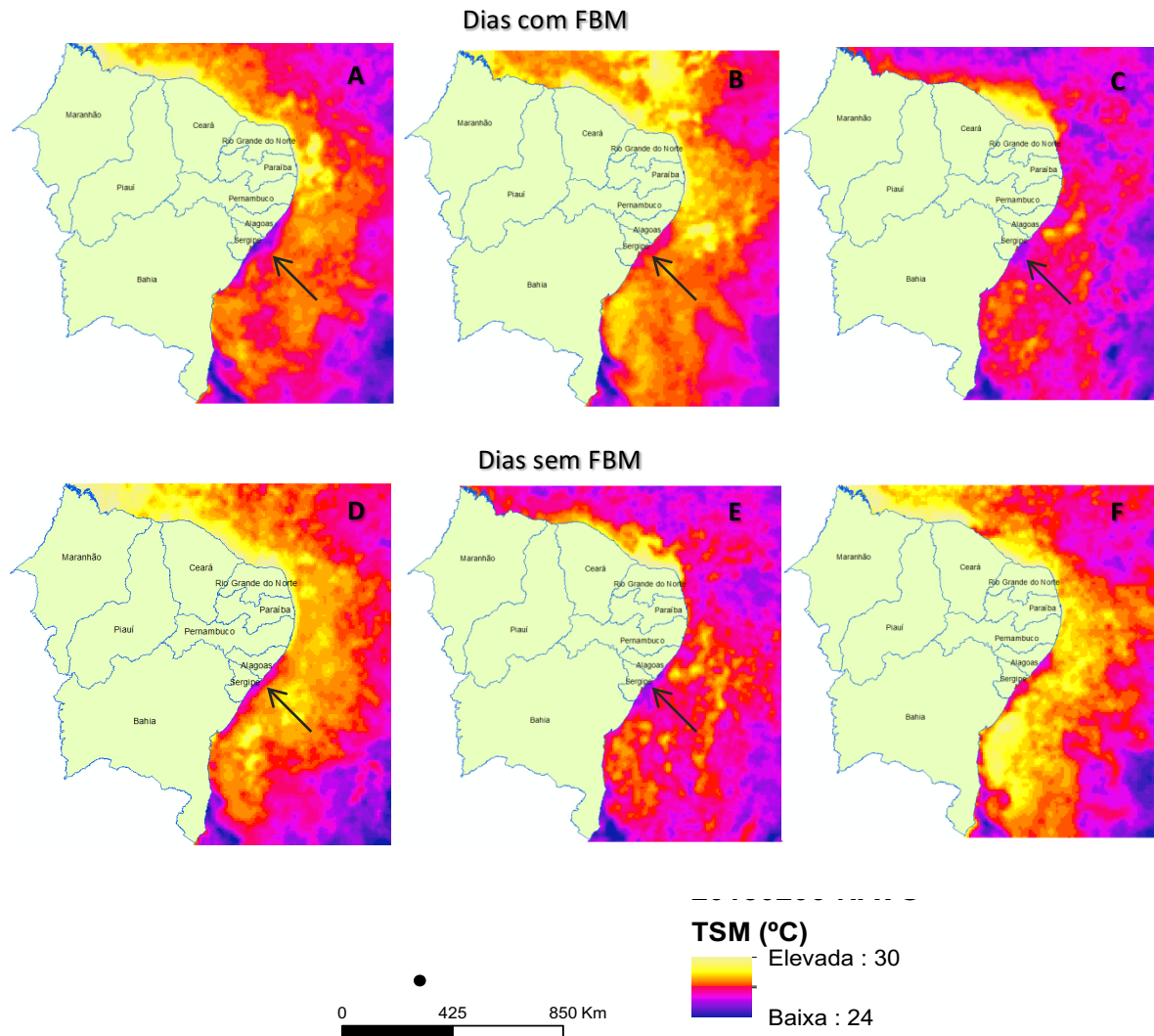


Figura 8: Imagens de satélite do AVHRR mostrando a TSM adjacente a região do nordeste do Brasil para três *dias com FBM* (A – 25-12-2504), (B- 03-01-2015), (C – 06-02-2015) e três *dias sem FBM* (D- 15-12-2014), (E – 07-02-2015), (F – 09-01-2015). Nota: As setas pretas mostram os possíveis casos de ressurgência costeira próxima ao Estado de Sergipe.

4.3 Característica observada da FBM

4.3.1 Ocorrência e ciclo diário

De um total de 847 imagens GOES-13 examinadas e um total de 121 dias analisados, o que corresponde a 381 ocorrências da FBM identificadas durante o verão 2015. A FBM ocorreu em 67 dias e 54 dias que não ocorreu

(Tabela 2), em que Março obteve o maior número de dias com a FBM (18), seguido por janeiro (17), fevereiro e dezembro (ambos com 16 dias).

A máxima ocorrência horária da FBM (60 casos) aconteceu às 16:00h e a mínima entre as 12:00h e as 19:00h, ambas com 47. Isto significa que a FBM teve o *início* às 12:00h e a *decaência* às 19:00h, o que leva a 7 horas definidas como o tempo de *duração*. Tendo em conta a velocidade média horária dos ventos apenas para os eventos com FBM, a *força* média da FBM de $3,7 \text{ ms}^{-1}$ foi registrada, incluindo a máxima de $4,0 \text{ ms}^{-1}$ às 1900h e mínima de $3,9 \text{ ms}^{-1}$ naturalmente às 13:00h (Figura 9). A direção da FBM caracterizou-se, em média, por 84° no período de *duração* como pode ser observado na figura 6.

Tabela 2: Estatística da ocorrência FBM no verão 2015.

| Mês/ano | Nº de dias com FBM | Nº de dias sem FBM | Nº total de dias analisados | Nº total de imagens GOES-13 analisadas |
|----------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|--|
| Dezembro/2014 | 16 | 15 | 31 | 217 |
| Janeiro/2015 | 17 | 14 | 31 | 217 |
| Fevereiro/2015 | 16 | 12 | 28 | 196 |
| Março/2015 | 18 | 13 | 31 | 217 |
| Total | 67 | 54 | 121 | 847 |

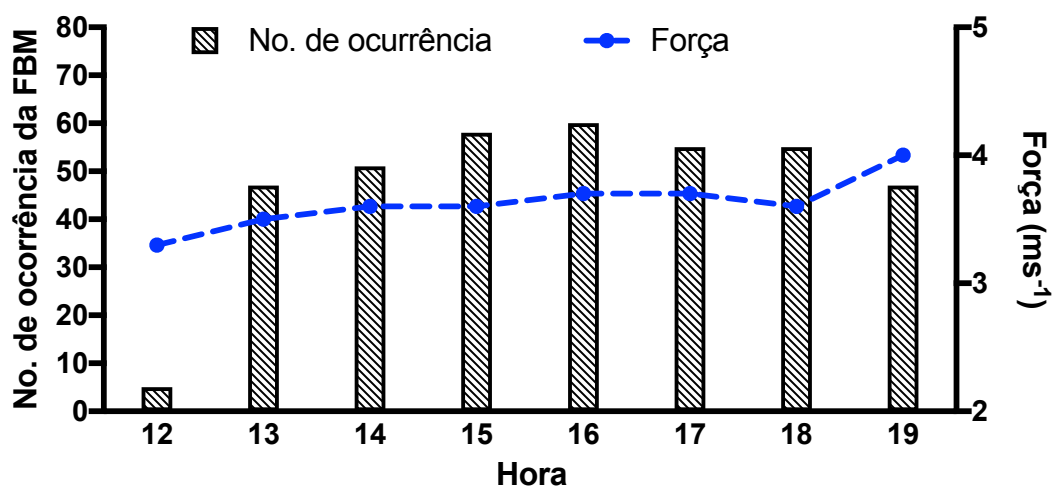


Figura 9: Número de ocorrência horária e força (velocidade do vento – linha azul) da FBM no verão 2015.

4.3.2 Organização espaciotemporal

A espacialização horária e mensal da ocorrência da FBM a partir das isócronas ao longo da orla continental sergipana pode ser visualizada na Figura 10. As isócronas foram identificadas e sintetizadas nos mapas para cada mês do período de estudo. A FBM apresentou-se muito uniforme para os meses analisados, embora com um pequeno destaque para março com o maior avanço para o interior às 19:00h. Tendo em consideração a média da passagem horária da FBM sintetizada para os meses do verão 2015, verifica-se na Figura 11 claramente o seu avanço sobre vários municípios da área de estudo, dos costeiros aos interiores. A FBM não foi identificada nos municípios limítrofes interiores como Poço Verde - a Sudoeste, e nos localizados na parte noroeste como Nossa Senhora da Glória, Poço Redondo e Canindé do São Francisco.

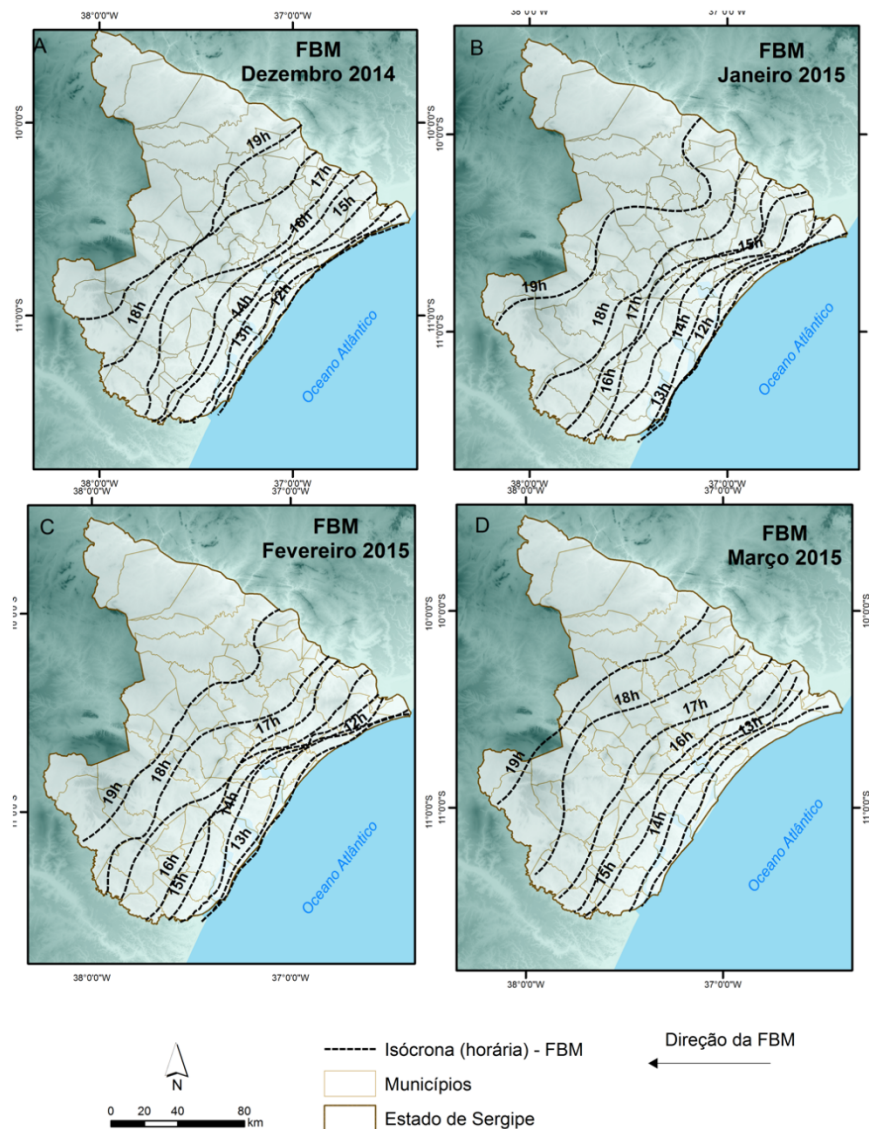


Figura 10: Espacialização horária das isócronas da FBM para os meses de dezembro de 2014 (A), janeiro (B), fevereiro (C) e março de 2015 (D).

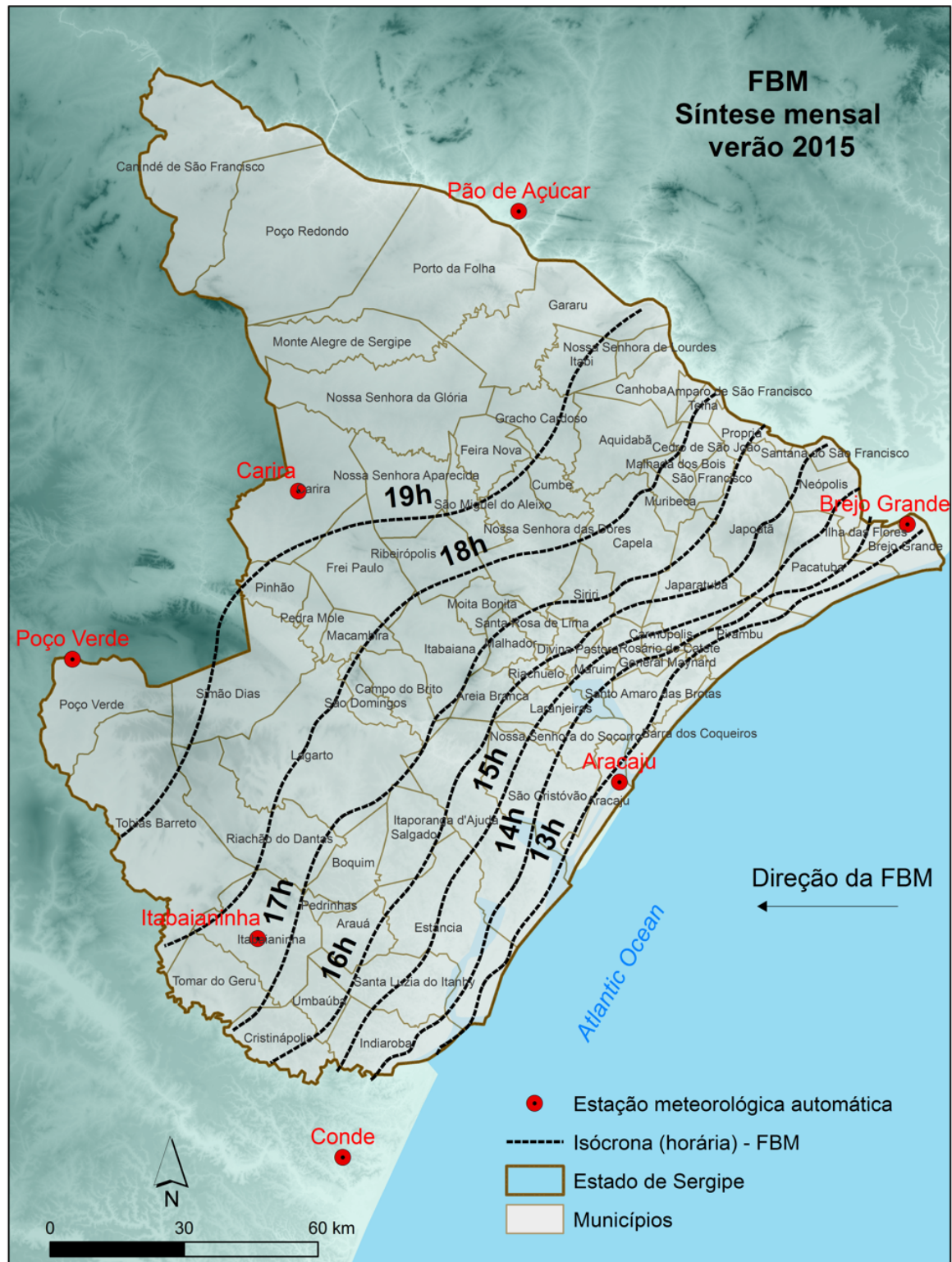


Figura 11: Isócronas representando a média da passagem horária da FBM sintetizadas para os meses do verão 2015.

Nota: são mostradas as estações meteorológicas de superfície onde foram calculadas a *força* (velocidade do vento) da FBM levando em conta o momento da sua passagem. Por exemplo, para o cálculo da *força* às 1300h foram usados somente os dados de velocidade do vento da estação meteorológica Aracaju. De igual modo, para determinar a *força* da FBM às 1700h foram usados, além dos dados da estação Aracaju os das estações de Brejo Grande e de Itabaianinha e, assim, sucessivamente (ver metodologia seção 3.4).

4.3.3 Avanço no interior do continente

O avanço horário da FBM pelo interior do continente foi calculado através de uma linha de observação projetada a partir da costa de Aracaju em direção ao interior do continente (Tabela 3). Como era esperado, observou-se um aumento gradual do avanço da FBM no continente no decorrer do dia e dos meses. A máxima distância da FBM em relação à costa foi de 94km (março) às 19:00h e a mínima distância de 3km às 12:00h (janeiro).

Levando a taxa média do avanço das isócronas em Março na Figura 12, verifica-se às 13:00h que a FBM esteve restrita às margens da costa nomeadamente sobre os municípios de Aracaju e Barra dos Coqueiros. Ao passo que às 16:00h, a FBM foi observada nos municípios de Laranjeiras e Itaporanga D'Ajuda localizados à 30km, o que representa um avanço, em média, de 10 km por hora. A partir das 17:00h, o avanço da FBM chegou nos municípios de Areia Branca e Itabaianinha, localizados a 43 km da costa. Às 19:00h, a FBM decaiu nos municípios de Carira e Pinhão a 94 km da costa.

Tabela 3: Avanço horário da FBM no interior do continente no verão 2015.

| Mês/ano | Hora (UTC) | | | | | | |
|-------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1300h | 1400h | 1500h | 1600h | 1700h | 1800h | 1900h |
| | Distância em relação à costa durante a ocorrência da FBM (km) | | | | | | |
| Dezembro -2014 | 7 | 15 | 18 | 32 | 48 | 62 | 72 |
| Janeiro-2015 | 3 | 14 | 24 | 36 | 43 | 50 | 80 |
| Fevereiro-2015 | 4 | 20 | 25 | 31 | 38 | 61 | 73 |
| Março -2015 | 6 | 17 | 27 | 33 | 50 | 82 | 94 |
| Síntese dos meses | 6 | 17 | 21 | 33 | 43 | 57 | 75 |

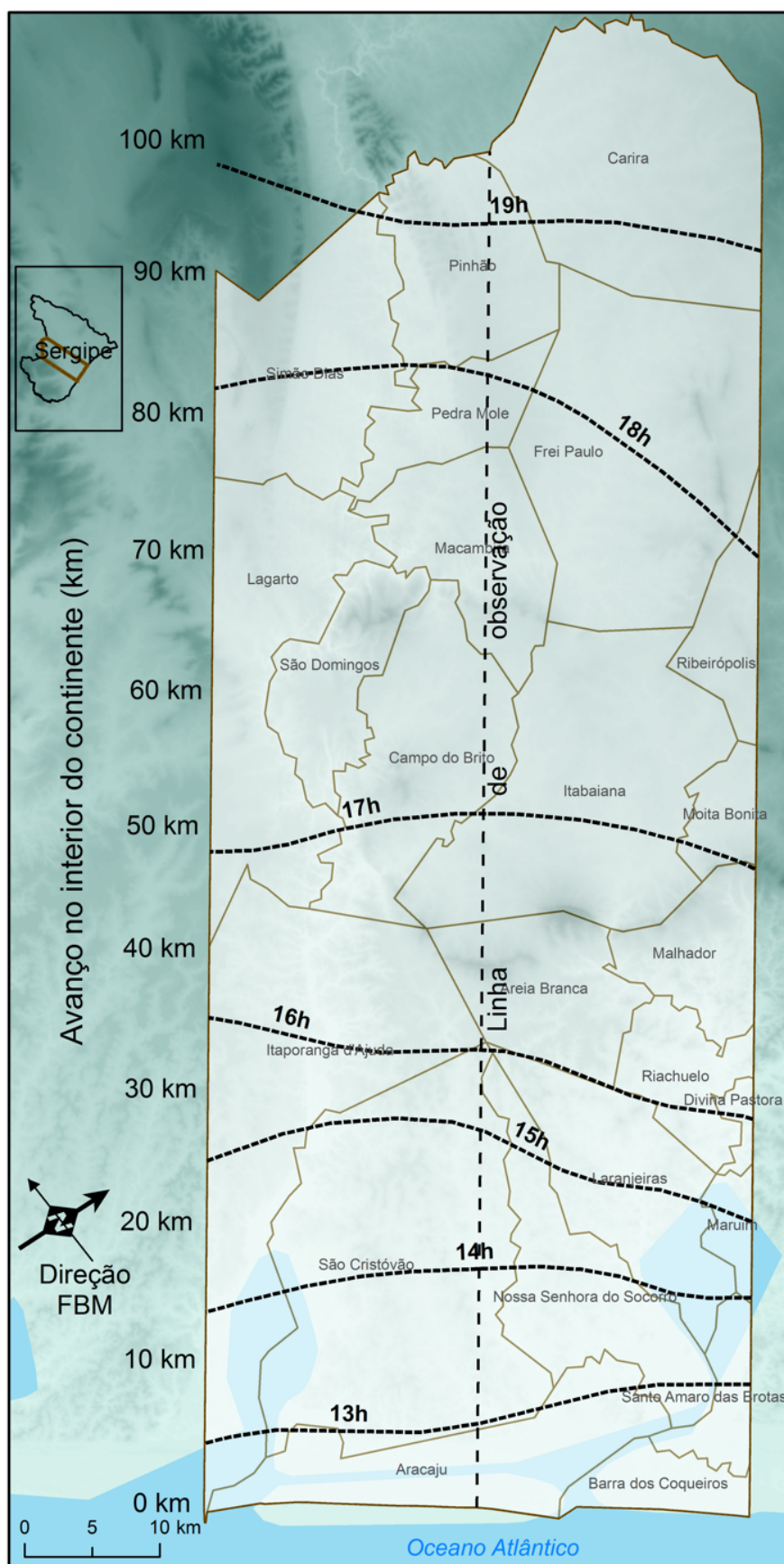


Figura 12: Isócronas representando a média horária do avanço da FBM durante março de 2015.

4.4 Relação entre a FBM e as condições meteorológicas

A análise comparativa de cinco variáveis referente às sete estações meteorológicas nos *dias com FBM* e nos *dias sem FBM* é apresentada na Tabela 4. O padrão estável do gradiente de pressão no verão 2015 caracterizou-se por baixa diferença nos valores médios, máximos e mínimos de pressão atmosférica (variando entre 967 hPa para Poço Verde e 1013 hPa para Aracaju). No que diz respeito à velocidade do vento, não houve grandes diferenças entre os *dias com FBM* e os *dias sem FBM*, exceto a diferença de mais 2 ms⁻¹ nos valores máximos da estação Carira nos *dias sem FBM*. Todavia, observou-se uma diferença positiva nos valores de radiação solar durante os *dias com FBM* em todas as estações meteorológicas, destacando a diferença média de 183 kJ m⁻² em Brejo Grande e 133 kJ m⁻² em Aracaju. O mesmo não ocorreu na máxima radiação solar, em que as diferenças aumentaram nos *dias sem FBM* chegando até 270 kJ m⁻² em Aracaju. A temperatura média foi 1°C superior nos *dias com FBM* em quase todas as estações, embora a máxima e mínima temperatura, bem como a umidade relativa, não apresentaram grandes diferenças.

A análise comparativa das médias diárias de cinco variáveis meteorológicas nos *dias com FBM* e os *dias sem FBM* referente ao período de estudo é ilustrada na Figura 13. Os dados de pressão atmosférica indicam claramente um padrão estável do gradiente de pressão sobre o Estado de Sergipe, embora se tenha notado uma diferença sutil do campo de pressão nos *dias com FBM* (Figura 13 (a)). Isto reflete a baixa variabilidade apresentada no curso diário dos ventos, em que a diferença média da velocidade do vento foi pouco perceptível entre os *dias com FBM* e os *dias sem FBM*, variando com a mínima de 1 ms⁻¹ às 09:00h e máxima de 4 ms⁻¹ às 20:00h, enquanto à direção média do vento observou-se uma rotação abrupta da com desvio de até 40° nos dois tipos de dias entre as 06:00h e as 10:00h (Figura 13 (b)).

Em relação à radiação solar, observou-se um aumento nos valores médios em que a diferença chegou até 290 kJ m⁻² (às 15:00h) a mais nos *dias com FBM* (Figura 13 (c)). Em consequência disso, foi verificado na região de Sergipe um aumento médio de temperatura de 1°C no período da tarde (às 16:00h) (Figura 13 (d)) e uma pequena diminuição nos valores médios de umidade relativa (10%) durante os *dias com FBM* (Figura 13 (e)).

Tabela 4: Estatística básica das condições meteorológicas de sete estações meteorológicas em dias com FBM e dias sem FBM no verão 2015.

| Estação meteorológica\ Distância em relação à costa | Dia com FBM | | | Dia sem FBM | | |
|--|---|------------|------|---|-------------|------------|
| | Média | Máx | Min | Média | Máx | Min |
| | Pressão Atmosférica (hPa) | | | Pressão Atmosférica (hPa) | | |
| Aracaju (3 km) | 1013 | 1017 | 1008 | 1012 | 1017 | 1008 |
| Brejo Grande (11 km) | 1013 | 1017 | 1009 | 1013 | 1018 | 1009 |
| Conde (11 km) | 1013 | 1017 | 1009 | 1012 | 1017 | 1009 |
| Itabaianinha (54 km) | 990 | 994 | 985 | 989 | 994 | 985 |
| Carira (99 km) | 980 | 984 | 975 | 980 | 984 | 975 |
| Poço Verde (120 km) | 972 | 976 | 966 | 971 | 975 | 967 |
| Pão de Açúcar (122 km) | 1010 | 1015 | 1004 | 1010 | 1015 | 1004 |
| | Velocidade do vento (ms ⁻¹) | | | Velocidade do vento (ms ⁻¹) | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Aracaju (3 km) | 3.6 | 7.2 | 0 | 3.3 | 7.0 | 0 |
| Brejo Grande (11 km) | 1.9 | 5.1 | 0 | 1.7 | 5.3 | 0 |
| Conde (11 km) | 1.7 | 5.7 | 0 | 1.6 | 6.1 | 0 |
| Itabaianinha (54 km) | 2.7 | 6.3 | 0.1 | 2.7 | 7.1 | 0.4 |
| Carira (99 km) | 4.1 | 8.7 | 0 | 4 | 10.6 | 0 |
| Poço Verde (120 km) | 3.4 | 10.3 | 0 | 3.3 | 10.3 | 0 |
| Pão de Açúcar (122 km) | 2.8 | 8.9 | 0 | 2.7 | 8 | 0 |
| | Radiação solar (kJ m ⁻²) | | | Radiação solar (kJ m ⁻²) | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Aracaju (3 km) | 905 | 6308 | 0 | 772 | 6578 | 0 |
| Brejo Grande (11 km) | 1015 | 3860 | 0 | 832 | 3883 | 0 |
| Conde (11 km) | 995 | 3891 | 0 | 905 | 3838 | 0 |
| Itabaianinha (54 km) | 949 | 3923 | 0 | 853 | 3947 | 0 |
| Carira (99 km) | 1112 | 4885 | 0 | 1032 | 4930 | 0 |
| Poço Verde (120 km) | 897 | 3998 | 0 | 827 | 3961 | 0 |
| Pão de Açúcar (122 km) | 1017 | 4123 | 0 | 930 | 4086 | 0 |
| | Temperatura (°C) | | | Temperatura (°C) | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Aracaju (3 km) | 28 | 34 | 23 | 27.5 | 33 | 22.5 |
| Brejo Grande (11 km) | 27 | 33 | 19.5 | 26.5 | 33 | 19.5 |
| Conde (11 km) | 26.5 | 32.5 | 19.5 | 26.5 | 32 | 20.5 |
| Itabaianinha (54 km) | 26 | 34 | 19.5 | 25 | 34 | 19.5 |
| Carira (99 km) | 26.5 | 36 | 18 | 26 | 36 | 19.5 |
| Poço Verde (120 km) | 25.5 | 35.5 | 18 | 25 | 35 | 18 |
| Pão de Açúcar (122 km) | 29 | 38 | 21 | 28 | 38.5 | 21 |
| | Umidade relativa (%) | | | Umidade relativa (%) | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Aracaju (3 km) | 71 | 94 | 49 | 74 | 94 | 49 |
| Brejo Grande (11 km) | 67 | 89 | 34 | 70 | 90 | 35 |
| Conde (11 km) | 77 | 96 | 44 | 78 | 96 | 48 |
| Itabaianinha (54 km) | 75 | 97 | 41 | 77 | 97 | 34 |
| Carira (99 km) | 67 | 100 | 25 | 71 | 100 | 26 |
| Poço Verde (120 km) | 75 | 100 | 29 | 78 | 100 | 32 |
| Pão de Açúcar (122 km) | 58 | 96 | 20 | 63 | 97 | 19 |

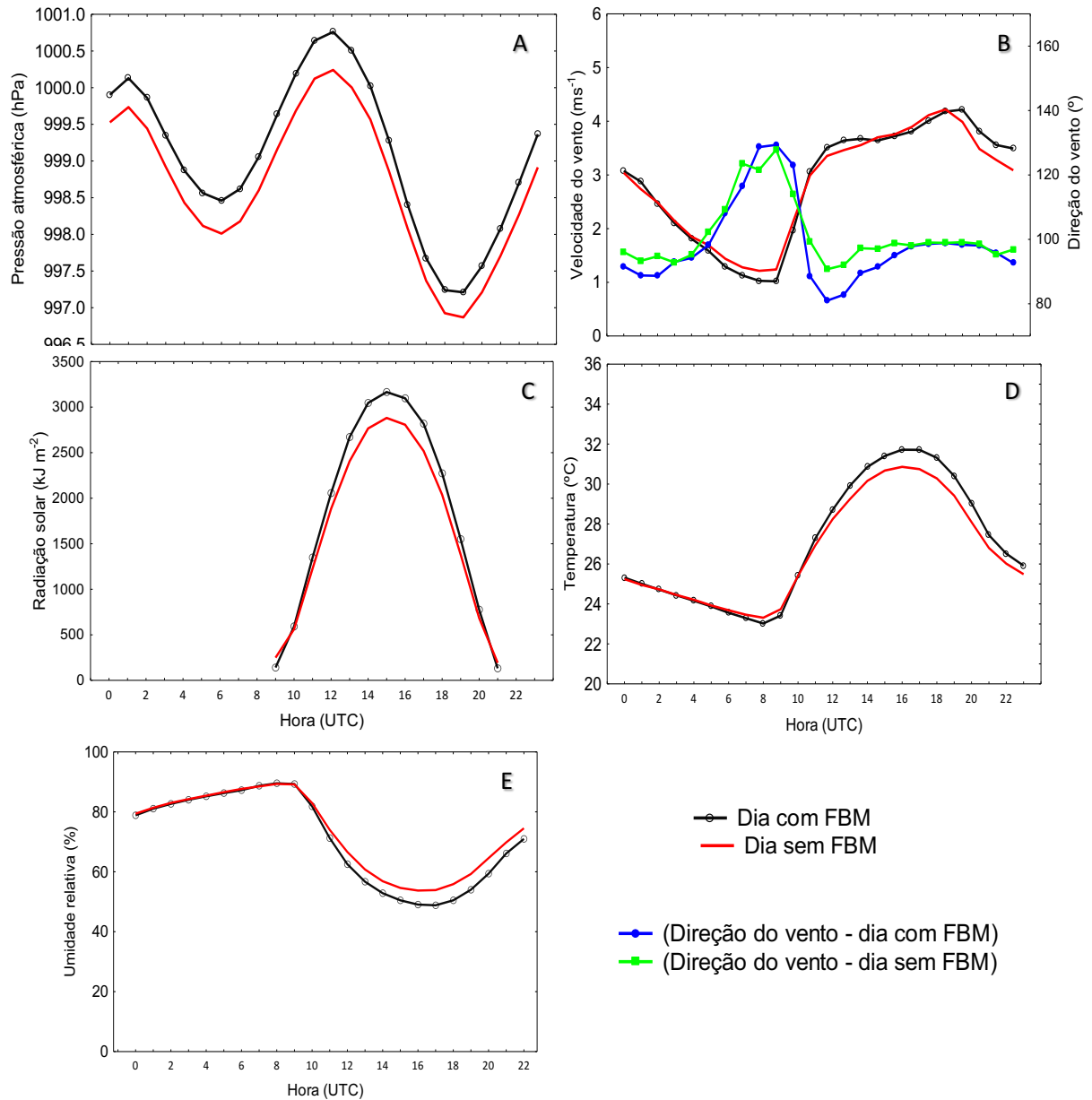


Figura 13: Médias horárias de seis variáveis meteorológicas sobre a região de Sergipe nos dias com FBM e nos dias sem FBM no verão 2015.

Nota: Valores médios da (A) pressão atmosférica (B) velocidade e direção do vento, (C) radiação solar, (D) temperatura do ar e (E) umidade relativa do ar obtidos através das sete estações meteorológicas usados neste estudo (ver localização das estações na figura 2)

5 Discussão

5.1 Padrões dos ventos regionais

Há, claramente, uma forte regularidade nas velocidades dos ventos no Estado de Sergipe variando entre 2.3 ms⁻¹ a 3.0 ms⁻¹; enquanto na direção a prevalência é de ventos Leste ao longo do ano e de Sudeste concentrados nos

meses inverno. Isso significa que a predominância dos ventos é de origem marinha (*onshore*), carregados de mistura e ar fresco para o continente. Esse tipo de informação é particularmente importante para o planejamento urbano, pois a prevalência da direção dos ventos juntamente com a velocidade ajuda a decidir onde centros industriais, residenciais ou projeto arquitetônicos devem ser construídos, de modo a minimizar o estresse térmico. Nesse caso, os edifícios ou assentamentos urbanos são beneficiados se forem projetados permitindo a ventilação de Leste, em segundo plano, de Sudeste. No caso das cidades, se as vias de circulação seguem essas orientações, a população pode ser beneficiada com a melhoria do conforto térmico e da qualidade do ar facilitada pelo transporte de poluentes atmosféricos para fora da cidade.

Entre todas as estações meteorológicas, a de Aracaju é usada como referência para capturar o comportamento das condições de vento associado às condições climáticas da cidade de Aracaju, pois esta estação é a mais afetada pela estrutura urbana. Para a série temporal 1961-2010, Anjos (2012a) mostrou que, em Aracaju, não há variação espacial significativa nos valores mensais de direção predominante dos ventos e das velocidades dos ventos devido à presença semipermanente do ASAS. Neste estudo, somados mais 3 anos (2014-2017), notou-se que os resultados corroboram naturalmente com os de Anjos (2012a), em que a prevalência anual de ventos em Aracaju foi de Leste nos meses de verão (95%) e com aumento na frequência (40%) dos ventos de Sudeste nos meses de inverno, enquanto as velocidades médias variaram entre 2 ms^{-1} a 3 ms^{-1} .

5.2 Frente de brisa marítima em Sergipe

O Estado de Sergipe está assente relativamente numa área de baixa topografia e costa relativamente retilínea, tornando-o mais exposto à prevalência de ventos alísios e o potencial avanço da FBM sobre o interior da área. Neste estudo foram apresentadas as primeiras evidências da presença e comportamento da FBM na região de Sergipe. O uso do sensoriamento remoto, nomeadamente as imagens de satélite GOES-13 quando complementado com os dados meteorológicos em superfície, revelou-se um método potencialmente útil para identificar a brisa marítima no Estado de Sergipe, o que resguardadas as características geográficas peculiares, poderá servir de referência para outras regiões costeiras.

O método de identificação da FBM é sensível às variações dos sistemas de escala sinóticas como o ASAS e os VCANs, que produzem as situações meteorológicas favoráveis (céu limpo, tempo estável e fraca nebulosidade) à identificação, sobre a imagem de satélite, da linha de cúmulos associada à FBM. Porém, os contrastes de aquecimento do ar tropical sobre a terra e as

superfícies líquidas adjacentes analisadas pelas TSM mostraram-se pouco relevantes à intensificação da FBM na região. Esses resultados podem estar de acordo com os de Mizzi e Pielke (1984) e Ribeiro et. al., (2011) em que as variações da TSM não intensificaram a frente de brisa. Apesar disso, foram encontrados fortes indícios de uma ressurgência costeira situada nas imediações do Estado de Sergipe, como se mostrou na Figura 8.

Baseado no método de identificação da FBM referido, elaborou-se a primeira climatologia da FBM no nordeste do Brasil que inclui o comportamento diário desse fenômeno. Os resultados revelaram que a FBM atua em Sergipe entre as 12:00h e as 19:00h, que corresponde entre 2 ou 3 horas após o nascer do sol e 2 horas antes o pôr-do-sol. Isto é consistente com o estudo de Azorin-Molina et al. (2009) em que demonstraram em Alicante – Espanha que, em média, a brisa marítima teve o *início* às 09:40h e a *decaência* às 20:00h. No início da tarde, verificou-se a passagem da FBM as distâncias entre 17 a 34km em relação à costa, o que está em conformidade com as observações de Simpson et al., (1977) e Damato et al., (2003), e no final da tarde com as de Planchon et al., (2006). No caso específico de Planchon et al., (2006), os autores mostraram FBM chegou a avançar 100km às 18:00h no interior da região Norte- Nordeste do Brasil, contra 82 km neste estudo. Simpson (1997) tem reportado que a magnitude do componente do vento associado ao ambiente da costa é um importante controlador do avanço da frente de brisa no interior do continente. Isto pode explicar o máximo avanço de 94km da FBM no interior do continente ocorrendo próximo ao pôr-do-sol, momento no qual a *força* média da FBM atingiu o máximo diário de 4.0 ms^{-1} , coincidindo com o pico médio diário das velocidades dos ventos alísios. Esses resultados reforçam a ideia que a brisa marítima nesta região é dependente do fluxo sinóptico, assumindo a aceção que os ventos alísios atuam em conjunto, tal como reportado por Verejão (2002), e que o aumento da *força* da FBM está relacionado com o aumento da velocidade dos ventos alísios, tal como descrito por Barreto et al., (2012).

Além disso, observou-se neste estudo *um aumento médio da radiação solar e da temperatura com a passagem da FBM*. Após a passagem da FBM, criar-se-ão, atrás da linha de nuvens, condições de céu claro que permite a entrada de mais radiação solar direta até a superfície. Essa energia disponível é, então, convertida em fluxos de calor sensível e armazenado no solo, o que eventualmente aumenta a temperatura da superfície e do ar, resultando em dias mais quentes. Por conta disso, houve o aumento médio 290 KJ m^{-2} da radiação solar e 1°C da temperatura nos *dias com FBM*, como ficou demonstrado nas Figura 13 (c)(d). Esses resultados estão em concordância com os de Khan (2010) em que constatou na região de Auckland uma diferença média 1.5°C na

temperatura do ar seguida de um aumento no fluxo solar até 3.0 MJ nos dias de brisa marítima. Em sequência verificou-se a pequena redução da umidade relativa com a passagem da FBM. À medida que o ar fresco do mar (*onshore*) entra no continente, espera-se que os níveis de umidade aumentem, contudo, devido ao aumento na temperatura verificado, a umidade relativa diminui durante os eventos FBM.

Os resultados relevados neste estudo se contrapõem à ideia comum de que a brisa marítima é um fenómeno sempre benéfico do ponto de vista térmico. A ideia que áreas costeiras em climas quentes frequentemente são beneficiadas pela passagem “fresca” da brisa marítima (Oke, 1987, p.170), parece ser mais complexa quando se trata do seu desenvolvimento sobre a costa do nordeste brasileiro. De fato, a FBM mostrou-se um elemento crítico para as áreas urbanas no Estado de Sergipe, posto que um aumento na temperatura e na radiação solar culminando com dias mais quentes com o desenvolvimento da FBM pode influir negativamente o conforto térmico humano.

5.3 Limitações

Este estudo apresenta as seguintes limitações:

- As variações, em simetria, dos sistemas de escala sinóticas parecem desempenhar um papel fundamental na dinâmica da brisa marítima. Todavia, a relação entre a FBM e os sistemas sinópticos levada a cabo neste estudo, limitou-se a uma amostra de poucos dias e, portanto, estudos futuros com amostras mais robustas podem fornecer novos elementos sobre essa relação.
- Assim como os sistemas sinópticos, os resultados da TSM e da ressurgência costeira foram limitados a uma pequena amostra e, portanto, necessitam de ser aprofundados em decorrência da sua relação com os ventos alísios bem como pela sua importância ecológica e econômica associada a ressurgência costeira (Valentin, 1999; Diniz et al., 2003).
- O estudo sobre a extensão vertical da brisa marítima em ambientes tropicais também ajudaria entender o avanço da FBM no interior do continente e a sua relação com o transporte de poluentes atmosféricos.

6 Conclusão

Os resultados relevaram que a brisa marítima, representada aqui pela FBM, mostrou-se um importante sistema de mesoescala no Estado de Sergipe principalmente devido à frequência e ao significado meteorológico que lhe confere. Através das imagens de satélite GOES-13, este estudo apresentou a primeira climatologia da FBM que inclui o comportamento diário (*início, duração, decadência, avanço no interior do continente, classificação dos dias com FBM*). Baseado nessa climatologia, foi possível avaliar a relação entre a FBM e as condições meteorológicas, em que evidenciou o aumento médio da radiação solar e temperatura durante os dias com frente de brisa. A relação da FBM com dias mais quentes apresentada neste estudo reacende uma questão importante na literatura especializada que trata, à primeira vista, a brisa marítima como elemento benéfico para as regiões onde ela se desenvolve. No caso específico da costa do Nordeste do Brasil, os planejadores urbanos têm que lidar com a possibilidade da brisa marítima aumentar o desconforto térmico humano, apesar de ser benéfica com a chegada do ar úmido e mais fresco. Para isso, serão efetuados mais estudos, de modo a avaliar as duas situações.

A atenção dada a esse aspecto, não diminui a importância da ventilação natural como importante medida mitigadora do estresse térmico, relativamente à qual os planejadores devem ter atenção. A avaliação climática passa necessariamente por adquirir um equilíbrio climático (ambiental) que permita minimizar os efeitos negativos e maximizar os positivos.

Por fim, os achados sobre o padrão dos ventos regionais e FBM compõem uma informação climática importante a ser integrada na construção do MCU de Aracaju, quer na produção de espaços mais aprazíveis do ponto de vista térmico ou na avaliação da qualidade do ar, temas que serão abordados nos próximos capítulos.

Capítulo 2: Rede Climatológica Urbana

1 Introdução

As observações meteorológicas estão entre as informações mais importantes para o funcionamento de qualquer cidade (Grimmond, 2013). Nos últimos anos, nota-se claramente um crescente aumento no monitoramento climatológico das cidades (Muller et al., 2013b; Lopes et al., 2013; Warren et al., 2016). Primeiro, devido aos avanços tecnológicos e científicos que disponibilizam equipamentos mais sofisticados e com precisão considerável, acompanhado de um melhor entendimento da atmosfera urbana em termos de processos físicos em escalas de tempo e espaço, agora acessíveis à comunidade de pesquisa e usuários (Grimmond, 2006; Oke 2006a); segundo, devido à necessidade de se investigar os impactos ambientais provocados pela urbanização, onde a ICU é um fenômeno de destaque; terceiro, porque justamente é nas áreas urbanas onde coincidentemente há insuficiente cobertura ou mesmo a inexistência de dados climatológicos contínuos nas escalas local e microclimáticas.

A produção dos Mapas Climáticos Urbanos (MCUs) necessita reunir diversos parâmetros climáticos *in situ*. É comum o uso de dados das estações meteorológicas automáticas e convencionais que, como se sabe, são representativas do clima regional e não local. As redes urbanas ajudam numa melhor avaliação climática através do monitoramento dos vários climas locais.

É de referir que não é tarefa fácil entrar em conformidade com as orientações padronizadas da Organização Meteorológica Mundial (OMM) quanto à localização dos equipamentos meteorológicos nas cidades. Segundo Oke, (2006a) a obstrução do fluxo de ar, troca de radiação pela massa de edifícios e árvores, contato com a cobertura de superfícies artificiais, a perda de calor e vapor de água causados por atividades humanas são algumas questões práticas que desafiam a instalação da rede climatológica urbana. Além disso, o elevado grau de complexidade da cidade exige uma atualização frequente da documentação referente à estação urbana pois nela há uma tendência maior na mudança de locais de observação e de uso do solo que impactam diretamente na aferição e qualidade dos dados (Oke, 2006a; Oke e Stewart, 2012).

Stewart (2011) verificou que um terço dos artigos analisados sobre o clima urbano não forneceu uma descrição qualitativa ou quantitativa dos locais utilizados (metadados), e que os dois terços restantes incluíram descrições

apenas qualitativa do local. É imprescindível, portanto, registrar todas os metadados que devem incluir os locais de instalação e informações sobre os equipamentos. Os metadados são informações estruturadas que descrevem, localizam ou de outro modo tornam mais fácil de recuperar, usar ou gerenciar um recurso de informação; metadados são dados sobre os dados ou informações sobre as informações (NISO, 2004; Baca, 2008). Os metadados são essenciais para “garantir que o usuário final dos dados não tenha qualquer dúvida sobre as condições em que os dados foram obtidos, reunidos e transmitidos, a fim de extrair conclusões precisas a partir de sua análise” (Aguilar et. al., 2003, p. 2).

De início, o objetivo específico da rede deve estar intrinsecamente ligado à escala de análise e de rede. Oke (2006b) admite que o reconhecimento das diferenças de escala nas cidades é uma chave fundamental para a concepção de estudos de clima urbano, de laboratório ou computador e também para criar conceitos válidos, modelos ou interpretações de dados. Em 2006, o autor propôs uma concepção científica de definição de escalas climáticas aplicadas em áreas urbanas (Oke, 2006a). Por outro lado, Muller et. al., (2013b) sugeriram a adoção de alguns critérios para a classificação de uma rede urbana: (i) a extensão da área que constitui o mais comum critério para definir a ‘escala de rede’ ou ‘tamanho da rede’; (ii) a resolução espacial ou densidade da rede, que depende da densidade de pontos de observação e da distância entre os sensores; (iii) a representatividade espacial das estações de monitoramento individuais que depende da atual localização dos instrumentos, intervalo de medida e exposição dos sensores.

Assim sendo, essa rede se destina mais especificamente a avaliar as condições climáticas da Atmosfera Urbana Inferior (AUI), onde ocorrem os processos atmosféricos em microescala localizados nas ruas, entre as edificações (Oke, 2006a; Grimmond, 2006; Alcoforado e Andrade, 2006; Alcoforado, 2010) e, como tal, os dados ou informações aplicadas a modelos e a estudos afins devem respeitar os processos atmosféricos na interface abaixo do nível dos telhados ou do topo dos edifícios até o solo. Uma característica identificada na AUI são os vales urbanos (*canyons urbanos*) representados pelas edificações que criam corredores onde o ar é canalizado ou retido. Nele, a radiação sofre múltiplas reflexões entre as ruas e as paredes dos edifícios com diferentes absorções (Oke, 1981; Oke, 1987; Grimmond, 2006). No que diz respeito à escala de rede, a RCU segue o nível mesoclimático (extensão da rede) para estudar a influência climática da toda cidade considerando as amplas variedades (densidade da rede) de climas locais (representatividade espacial) influenciados pela morfologia urbana (densidade de construção, espaços verdes e corpos d’água) que, por sua vez, tem uma resposta microclimática semelhante.

Por esses aspectos, um enorme esforço foi feito para a implementação de uma Rede Climatológica Urbana na área administrativa de Aracaju (RCU) cujo objectivo é identificar os efeitos da cobertura do solo e morfologia urbana na intensidade da ICU. Entende-se que uma cobertura climatológica suficientemente densa na cidade oferece uma oportunidade para compreender melhor a intensidade da ICU pois o fornecimento de dados climatológicos contínuos nas escalas local e microclimáticas, por um tempo suficientemente longo, permite uma melhor apreciação das influências climáticas advindas da complexidade da morfologia urbana com vista à produção de mapas climáticos urbanos.

2 Descrição da rede

2.1 Seleção dos locais de observação

A implantação da RCU fundamenta-se nos princípios e conceitos de Oke, (2006a) que são os únicos para áreas urbanas, particularmente no que concernem às questões relacionadas com as escalas climáticas, a exposição dos equipamentos, a morfologia urbana e os metadados. Para a seleção dos locais de observação foi utilizada a metodologia das *Local Climate Zones* (LCZ) proposta por Stewart e Oke (2012). As LCZs consistem de 17 padrões urbanos em que cada um tem uma morfologia urbana e, teoricamente, uma resposta homogênea. O mapa das LCZs de Aracaju e os procedimentos metodológicos que levaram à sua construção serão abordados no capítulo 6.

Além de facilitar a seleção dos locais de observação, a classificação da LCZ (Stewart e Oke, 2012):

- Facilita a documentação dos metadados em cada local de observação e melhora as bases de comparação entre os locais;
- Ajudar a definir um protocolo objetivo para medir a intensidade dos efeitos térmicos e higrométricos de Aracaju;
- Fornece dados de *input* para modelos de padrões de temperatura intra-urbana e intensidades da ICU bem como para a obtenção de estudos de mudanças climáticas.
- Disponibiliza princípios do clima urbano (escalas espaciais, elementos do design, cobertura da superfície, taxa de vegetação) para arquitetos, planejadores, ecologistas, engenheiros e governo local.

A classificação dos locais de observação contou também com o conhecimento local (Anjos, 2012a). Além de avaliar as condições térmicas de

vários locais dentro da cidade, as estações urbanas foram estrategicamente instaladas segundo alinhamentos transversais e paralelos à costa, o que permitiu avaliar a influência do conjunto de características não urbanas nos padrões térmicos locais como a ventilação. Por ser relativamente plana (altitude entre 4 a 100 metros), a topografia não foi levada em conta durante o processo de escolha dos locais de observação, pois não desempenha um papel relevante nas diferenças térmicas à escala local (Anjos, 2012a). Na Figura 14 apresentam-se os locais de observação da RCU.

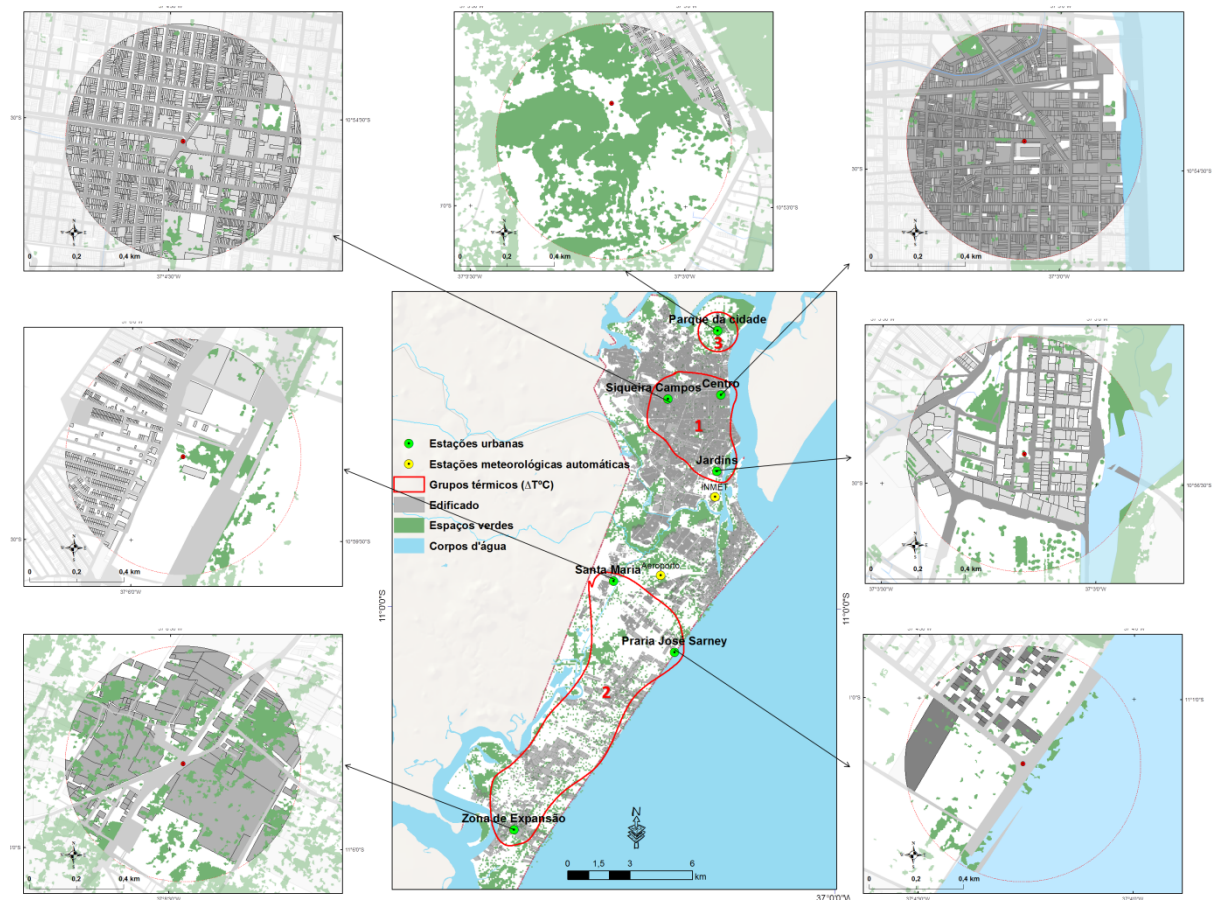
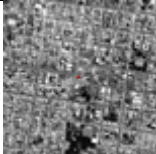


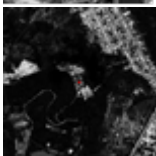
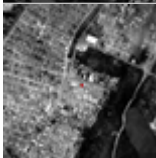
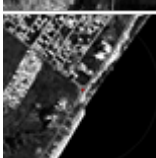



Figura 14: Rede Climatológica Urbana de Aracaju (2014-2016).

Os sensores (doravante chamado de estação urbana) estão centrados em espaço aberto onde a relação do aspecto circundante H/W [que aqui, representamos com os valores de Fator de visão do céu (ψ)], as taxas de estrutura urbana e de coberturas permeáveis (λ_v) e impermeáveis (λ_I) são aproximadamente representativos da localidade, uma vez que esses parâmetros físicos influenciam a temperatura do ar próximo ao sensor (Tabela 5).

Tabela 5: Caracterização das estações urbanas e as correspondentes LCZs.

| Estação urbana | Tipo de LCZ | Escala local (> 1km ²) ¹ | | | | | Foto aérea |
|-------------------|---|---|---|--|---------------------------------------|--|---|
| | | FVC ² (0 a 1) | Taxa de edificação ³ (%) | Taxa de superfície impermeável ⁴ (%) | Taxa vegetação ⁵ (%) | Taxa corpos d'água ⁶ (%) | |
| Siqueira Campos | Ocupação compacta e edificações baixas (LCZ 3) | 0.808 | 76 | 95 | 3.5 | 0 |  |
| Centro da Cidade | Ocupação compacta e edificações baixas (LCZ 3) | 0.708 | 69 | 93 | 2.3 | 0 |  |
| Jardins | Ocupação aberta e edificações elevadas (LCZ 4) | 0.768 | 46 | 50 | 12 | 6.4 |  |
| Parque da Cidade | Vegetação densa (LCZ A) | 0.948 | 5.5 | 7.5 | 73 | 0 |  |
| Santa Maria | Ocupação desordenada e edificações baixas (LCZ 7) | 0.953 | 25 | 49 | 9.5 | 0 |  |
| Praia José Sarney | Ocupação aberta e edificações baixas (LCZ 6) | 0.965 | 12 | 23 | 6 | 50 |  |
| Zona de Expansão | Assentamento espaçado (LCZ 9) | 0.981 | 40 | 48 | 50 | 0 |  |

¹A medição dentro de um círculo de 500 metros, centrado a partir do sensor.

²Cálculo a partir do software SVF mapping tool (Gál e Unger, 2014).

2.2 Operação

Os sensores usados na RCU são do tipo Onset® (EUA) HOBO U23 *Pro v2 Temperature/Relative Humidity Data Logger* - U23-001 (dois) e HOBO U23 *Pro v2 External Temperature Data Logger* - U23-00 (cinco). Estes sensores são destinados para o uso de ambientes externos (*outdoor*), cada sensor tem um protetor solar que o protege dos efeitos do aquecimento, do vento, da chuva e de outros elementos a fim de assegurar uma medição precisa. Os sensores do tipo HOBO têm sido usados em outros estudos que abordam os climas locais como os de Lisboa (Lopes et. al., 2013), Florença (Petralli et. al., 2010) e Alaska

(Hinkel e Nelson, 2007). Todos os sensores foram instalados a 3,5 metros acima do solo para registrar a temperatura e umidade relativa. Utilizaram-se revestimento de cortiça nos postes para evitar sobreaquecimentos por condução nos sensores (Figura 15).



Figura 15: Instalação dos sensores da RCU a 3,5m acima do solo.

As estações urbanas foram instaladas nos locais (escolas, repartições públicas) onde oferecem segurança contra eventuais vandalismos e registrar dados interrompidos. Tais prioridades, todavia, nem sempre coincidem, em sua totalidade, com os conceitos e princípios para áreas urbanas mencionados (H/W nem sempre representativo da área).

Antes de serem levados a campo, todos os sensores passaram pelo controle de qualidade a fim de verificar a coerência interna da série analisada (por exemplo, dessincronização, valor irreal) e ajustados de acordo com estação meteorológica automática do INMET. A intercomparação dos equipamentos meteorológicos ocorreu nas instalações do 4º Distrito de Meteorologia da BA/SE em Aracaju, órgão do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no período de 4 a 16 de Julho de 2014. Foram comparadas as médias horárias de

temperatura do ar e a umidade relativa do ar entre o sensor HOBO e a estação meteorológica automática do INMET⁵.

Os resultados mostraram uma forte correlação entre os valores do sensor HOBO e estação do INMET, em que as equações ajustadas proporcionaram coeficientes consideráveis com precisão de 0.93 para a temperatura do ar e de 0.90 para a umidade relativa do ar (Figura 16 a-d). Todavia, efetuou-se a correção de 0.5°C a mais nos valores de temperatura do ar na estação do INMET entre o período entre as 1000h e as 1400h. A comparação para a média horária da umidade relativa esteve dentro dos parâmetros aceitáveis com diferenças entorno de 3%.

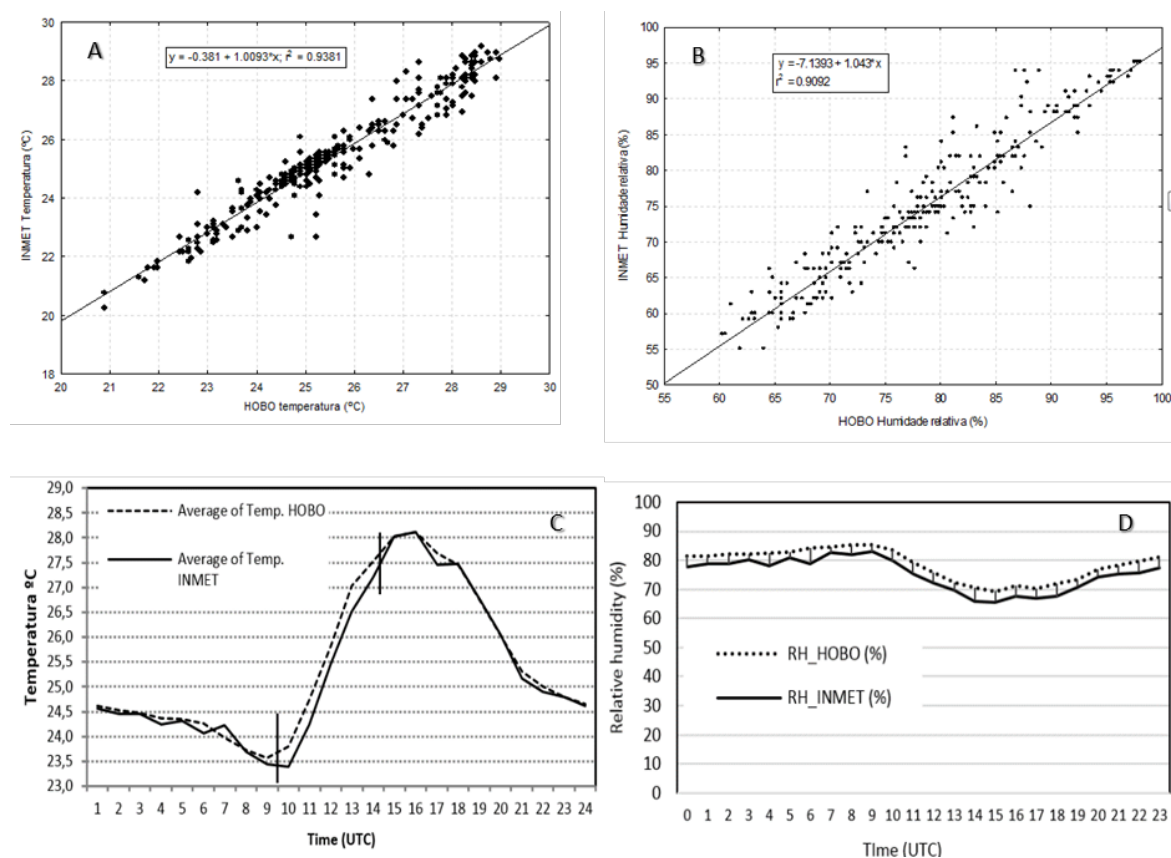


Figura 16: Correlações lineares (a-b) e médias horárias (c-d) entre os valores de temperatura do ar e umidade relativa para os sensores HOBO e a estação meteorológica do INMET entre 04 e 16 de junho de 2014.

Sendo a rede de carácter permanente, o teste de homogeneidade e a recuperação dos dados foram incluídos no projeto da RCU. O teste de homogeneidade é realizado para assegurar que as flutuações de tempo nos

⁵ Esta estação é de fabricação finlandesa, marca Vaisala e modelo MAWS 301 (Nota técnica nº. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET).

dados são apenas devido às variações de temperatura e umidade (Aguilar et al., 2003). A homogeneidade temporal de um registro climático é essencial na investigação climatológica, especialmente quando os dados são usados para validar os modelos climáticos, as estimativas por satélite ou para avaliar as mudanças climáticas e seus impactos ambientais e socioeconômicos associados (Aguilar et al., 2003). A recuperação dos dados é para aqueles que foram modificados ou faltantes e posteriormente preenchidos. Por exemplo, quando as observações são submetidas a algum tipo de validação, controle de qualidade ou teste de homogeneidade, uma quantidade variável de valores é sinalizada como ausentes, suspeito ou não homogêneo (Aguilar et al., 2003). Campanhas de recolhas de dados e manutenção dos equipamentos meteorológicos têm sido realizadas a cada 3 meses para garantir o estado de bom funcionamento da rede. Para isso, algumas técnicas têm sido empregadas (Fiebrich et al., 2006; Aguilar et al., 2003), a saber: (i) padronizar os procedimentos de manutenção em cada local de observação; (ii) documentar as características do local incluindo fotografias digitais; (iii) garantir a manutenção da vegetação (quando necessário para as áreas representativas de espaço verde e áreas rurais); (iv) limpar e inspecionar os sensores; testar o desempenho de sensores em campo (a cada 2 anos de funcionamento). O procedimento padronizado de manutenção é extremamente útil para que a rede opere eficientemente fornecendo dados confiáveis. Essa atualização da rede é parte a ser incorporada nos metadados.

2.3 Metadados

Seguindo as recomendações de Oke (2006a), Aguilar et al., (2003) e Muller et al., (2013a), desenvolveu-se uma plataforma de metadados para a RCU com o objetivo de melhorar a qualidade e aplicabilidade das informações coletadas. Os metadados da RCU foram estruturados basicamente em quatro partes. Na primeira parte, encontram-se as informações gerais da rede (pessoal e entidade responsável, o tipo da rede se é meso, local ou micro climática, objetivo); e as especificações dos equipamentos utilizados. Na segunda parte, são fornecidas as informações específicas da cada estação urbana e a classificação térmica dos locais dentro de um círculo de influência térmica. O círculo de influência ou *thermal source area* dum local de medição é o total de área de superfície “vista” pelo sensor, a 1.5 ou a 2m acima do solo, em que o sinal de temperatura é derivado das características geométricas da superfície, da camada limite urbana e das condições de estabilidade (Kljun et al., 2002; Oke, 2006a; Alves e Biudes, 2013). Foram usados nos metadados da RCU os círculos de influência de 100 e 500 metros a partir do sensor como

sendo representativos da escala microclimática e local, respectivamente. À escala microclimática, a modificação da temperatura do ar e do campo de vento está relacionada com características da superfície mais próxima (edifícios individuais, árvores, ruas), enquanto à escala local, tais modificações são influenciadas pela morfologia urbana homogênea (densidades dos edifícios, materiais mais frequentes), metabolismo urbano e posição topográfica (Oke, 2006a; Alcoforado, 2010).

A terceira parte destina-se à representação do ambiente físico envolvente através de imagens de satélite, fotografias digitais (localização, aérea, SVF, panorâmica e cardinal) e vídeos. A quarta parte compreende o registro histórico da estação para verificar se houve suspensão ou deslocamento da estação urbana devido à mudança no uso do solo ou falha técnicas no equipamento. Nessa parte, são documentados também erros identificáveis durante o registro ou quaisquer eventualidades que possam interferir na qualidade dos dados. A plataforma dos metadados da RCU pode ser consultada, em sua íntegra, no Anexo 1.

3 Conclusão

Nos próximos capítulos utilizar-se-ão dados horários (UTC) de temperatura, humidade relativa de vários locais na cidade no período referente a 19 de Julho de 2014 a 10 de Outubro de 2016. Esses dados irão auxiliar os estudos que fazem uso de informações climáticas confiáveis notadamente destinadas às orientações climáticas para o ordenamento do território. Para isso, a RCU levou em conta a complexidade dos espaços urbanos que interferem no funcionamento da rede e nos processos climáticos que ocorrem nas diferentes escalas (local e microclimática), os quais têm implicações importantes na qualidade e potencial aplicação dos dados.

Não obstante a aplicação de experiências de outras redes meteorológicas do mundo, a RCU pode vir-a-ser referência nacional para outras cidades brasileiras que carecem de uma rede climatológica local articulada para estudos voltados à avaliação climática da cidade.

Capítulo 3: Climas locais, Ilha de Calor e Ilha de Frescor Urbanos

1 Introdução

A Ilha de Calor Urbano (ICU) é um dos fenômenos climáticos urbanos mais conhecidos na atualidade. A necessidade de investigar mais precisamente a ICU vem aumentando nas últimas décadas devido aos seus incontestáveis impactos na sociedade e ambiente urbano. Focar-se-á na compreensão da natureza e da intensidade da ICU e a influência dos espaços verdes na temperatura intraurbana.

1.1 Tipos e estrutura da ICU

A ICU é o resultado da modificação eficaz da quantidade de energia térmica absorvida, armazenada e transferida resultando num ambiente urbano mais aquecido em relação à área envolvente. A compreensão da natureza da ICU passa pela compreensão das escalas climáticas urbanas e dos processos que ocorrem em cada uma delas. Baseado nisso, Oke (1987; 2009) sugeriu vários tipos e subtipos desse fenômeno: i) Superfície; ii) Atmosfera Urbana Inferior (*Urban Canopy Layer*) e iii) Atmosfera Urbana Superior (*Urban Boundary Layer*) (tradução sugerida por Alcoforado, 2010) (Figura 17). Este estudo focou-se na ICU da Atmosfera Urbana Inferior (*Urban Canopy Layer*-CLUHI, que doravante designa-se apenas por ICU) através de estações urbanas fixas representativas da escala local ou de bairro.

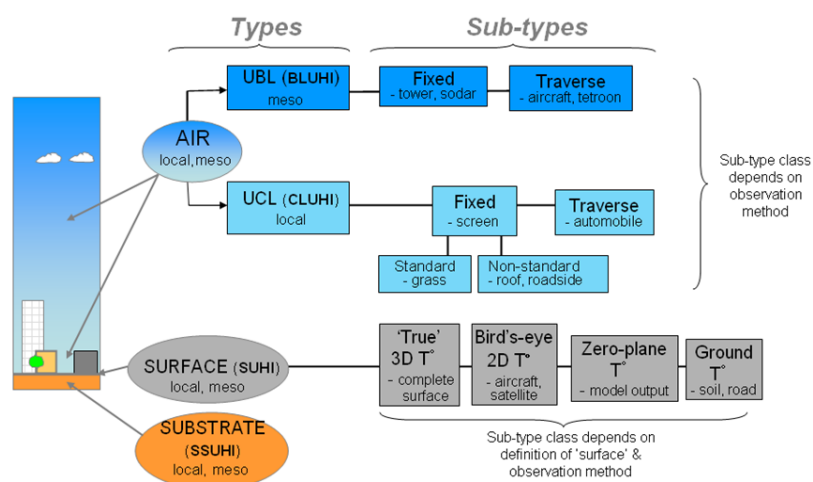


Figura 17: Tipos e subtipos da ICU adaptado de Oke (2009)

A estrutura da ICU pode ser entendida através da análise do balanço de energia urbano, conforme as equações propostas por Oke (1988):

$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS + \Delta QA \quad (1)$$

$$Q^* = K^* + L^* \quad (2)$$

$$\text{com} \\ Q^* = (K\downarrow - K\uparrow) + (L\downarrow - L\uparrow), (W \cdot m^{-2}) \quad (3)$$

em que Q^* é o balanço de radiação,

QF o fluxo de calor antrópico,

QH o fluxo turbulento de calor sensível,

QE o fluxo turbulento de calor latente,

ΔQS o fluxo de calor armazenado no solo e nos edifícios

ΔQA representa o fluxo horizontal advectivo através da camada limite urbana.

A energia disponível em qualquer local para aquecer o ar, o solo ou evaporar a água depende do balanço de radiação Q^* que depende do balanço de radiação (K^*) de pequeno comprimento de onda (direta ou difusa) ($K\downarrow$) e refletida ($K\uparrow$), bem como depende do balanço de radiação de grande comprimento de onda (L^*) emitida pela atmosfera ($L\downarrow$) e emitida pela superfície da terra ($L\uparrow$).

A presença da cidade com a miríade de superfícies impermeáveis e permeáveis altera todos os componentes individualmente mencionados e, portanto, a ICU passa a ser o resultado da diferença (combinada) do balanço de energia entre as superfícies urbanas e não urbanas. Inúmeros estudos têm observado que o aumento da superfície de área e o aprisionamento da radiação pela geometria dos *canyons* podem aumentar o K^* , e o controle de $K\downarrow$ depende primeiramente da latitude, onde a nebulosidade sobre a região desempenha papel relevante ao interferir na radiação direta e difusa (Morris et. al., 2001). Os valores de $K\downarrow$, por sua vez, podem chegar a 10% inferiores em comparação com a zona rural devido à composição poluída e quente da atmosfera urbana (Heisler e Brazel, 2010). E quanto mais poluído é o ar, maior será a absorção e reemissão de $L\downarrow$. Contudo, L^* é compensado pela geometria das superfícies que aprisiona a radiação de ondas longas resultando numa menor perda de $L\uparrow$ ao nível do *canyon* da rua (Oke, 1988). Durante a noite começa uma maior perda da $L\uparrow$ que, em seu turno, é compensada pela retirada de calor armazenado nos materiais de construção e solo (ΔQS) e pelo fluxo de calor antrópico (QF). Daí, a distinção entre as áreas urbanas e não urbanas ser mais propícia em função

das taxas de arrefecimento noturno, como aliás, tem sido a aceção chave do caráter eminentemente noturno da ICU (Oke, 1982).

O QF é o calor dentro da atmosfera urbana inferior principalmente pelo tráfico no *canyon* urbano ou ar condicionados colocados na parede dos edifícios (Oke, 1988). O QF depende assim do uso *per capita* de energia, da robustez do sistema de transporte e das atividades industriais da cidade (Sailor e Lu, 2004).

As propriedades radiativas de materiais da superfície influenciam a ΔQS em função do albedo, temperatura e emissividade da superfície, e, por conseguinte, influenciam as radiações de onda curta e longa e os respectivos fluxos QE e QH (Oke, 1987; Grimmond et al., 2010). É comum, durante o dia o QE reduzir, exceto quando o processo de evapotranspiração ocorra em locais que dependem da quantidade de espaço verde, umidade da superfície (ou com irrigação) e precipitação. Por causa da menor QE na cidade, o calor durante o dia é preferencialmente canalizado para as formas sensíveis, o que resulta num aquecimento do ambiente (Roth, 2000). Os fluxos convectivos, por sua vez, são influenciados pelo transporte horizontal do calor (ΔQA) dentro da camada limite atmosférica⁶ (CLA) (Oke, 1987; Lopes, 2003). ΔQA está associado à natureza quente e rugosa da superfície urbana que, durante o dia, promove a mistura turbulenta e condições instáveis e, durante a noite, condições estáveis ou neutras, especialmente no verão e nas áreas densamente urbanizadas.

1.2 As várias abordagens para o estudo da ICU

A intensidade da ICU é geralmente definida como a diferença de temperatura entre a área urbana e a rural ($\Delta Tu-r$) e estudada através de duas abordagens principais que apresentam vantagens e desvantagens no *modus operandi*. A primeira abordagem é comparar a temperatura de um ponto na área urbana (tido como mais quente) e outro na área rural (tido como o mais fresco). Ao tratar-se das cidades brasileiras, por exemplo, definir em termos qualitativos (Martin-Vide et al., 2015) o que é realmente “urbano” e “rural” não é tarefa fácil, posto que eles ganham conotações diferentes. Significa que nem sempre a área central é a mais quente ou que não se pode desprezar o aquecimento das áreas não urbanas. Apesar da $\Delta Tu-r$ tem sido útil na ausência

⁶ CLA é a camada de ar imediatamente acima da superfície da terra, cujos efeitos de atrito, aquecimento e arrefecimentos são sentidos diretamente à escala temporal inferior a um dia e onde os fluxos de quantidade de movimento, energia (nomeadamente calor) e massa são transportados e difundidos pelos movimentos turbulentos. A espessura da CLA é definida como altura acima da superfície terrestre onde a velocidade atinge 99% da velocidade do escoamento não perturbado (Lopes, 2003, p. 20)

duma rede de monitoramento urbano e pela limitação de recursos, a sua resolução espacial é restrita aos locais de observação, os quais não abarcam satisfatoriamente toda a complexidade do uso do solo. A análise dos estudos sobre a ICU por um período longo (série anual) utiliza geralmente as estações da rede nacional (não urbanas) que são representativas do clima regional e não local (Alcoforado, 2006).

Aqui, fazemos uma distinção singela entre clima local e ICU. Apesar de ambos estão diretamente relacionados, eles se diferem fundamentalmente na escala de análise. Enquanto o clima local é a sucessão (habitual) de microclimas, a ICU é a sucessão de climas locais das áreas urbanas comparativamente aos da área rural. Por exemplo, uma estação localizada no bairro específico ou num vale encaixado a comparar com uma estação na área rural, o que se está analisando é a diferença térmica particular entre dois climas locais. Para se chegar a ΔT_{u-r} que corresponde a ICU, é preciso dirimir as influências microclimáticas de cada estação para que a influência local predomine. Alguns estudos têm utilizado como estratégia grupos de estações representativas da área urbana e da área rural ($\Delta T_{u_{grupo}} - r_{grupo}$) (Morris et al., 2001; Lopes et al., 2013; Alcoforado et al., 2014), invés de apenas uma representando cada área.

A segunda abordagem mais usada como indicativo da intensidade da ICU é a medição da temperatura ao longo de um transecto pelos diferentes usos do solo, usando uma plataforma móvel. O transecto móvel tem a vantagem compensatória que é a alta resolução espacial das medições, mas essa técnica é limitada ao aspecto temporal, geralmente efetuado em poucas horas do dia. Os dias escolhidos para as medições são normalmente em condições anticiclônicas estáveis que geralmente são descritas como céu limpo ou pouco nublado, baixa velocidade do vento e sem ocorrência de precipitação ($Q_H + Q_E \sim 0$) (Oke e Maxwell, 1975; Oke 2006a; Rizwan et al., 2008). Em tais condições, as diferenças térmicas horizontais do urbano-rural a partir do sensor e as propriedades térmicas do substrato tornam a intensidade da ICU mais evidente (Oke, 1987). Todavia, essas condições de tempo podem representar uma limitada parte dos fatores atuantes na região, o que levaria a interpretações limitadas ou a generalizações simplistas sobre a intensidade da ICU. Morris et. al., (2001) alertou que muitos estudos da ICU têm estado restritos às condições de tempo atípicas, normalmente amostradas sobre um período de tempo limitado.

Quando é levada a um monitoramento consistente ao longo do tempo, a ICU pode levar a diferenças de temperatura muito complexas entre o urbano e seus arredores. Em Melbourne, Morris et. al., (2001) verificaram que a ICU se desenvolveu em condições de vento forte e céu encoberto (8 oitavos). Em

Lisboa, Lopes et. al., (2013) demonstraram que as intensidades da ICU incluindo as máximas ocorrem com ventos moderados de norte da cidade causando um efeito de abrigo nas áreas mais aquecidas.

Entende-se, desse modo, que a limitação espacial e temporal das abordagens ΔT_{u-r} e o transecto móvel pode aumentar as inconsistências verificadas no modelo conceitual ou da natureza da ICU (Stewart, 2011) ou pode levar a ideia generalista da literatura que apenas as diferenças de temperatura dentro da cidade são o suficiente para explicar a ICU (Oke, 2009). Uma cobertura climatológica suficientemente densa na cidade oferece uma oportunidade para compreender melhor a intensidade da ICU, pois o fornecimento de dados climatológicos contínuos nas escalas local e microclimática, por um tempo suficientemente longo, permite uma melhor apreciação das influências climáticas advindas da complexidade do uso do solo, incluindo-as as diferentes condições de tempo atuantes na região. Além disso, um denso monitoramento climatológico urbano permite estudar os fenômenos associados a ICU em maior profundidade, como é caso da Ilha de Frescor Urbano. O que se propõe neste estudo é uma alternativa que consiste em avaliar a intensidade da ICU mais precisamente.

1.3 Ilha de Frescor Urbano

Neste estudo, a Ilha de Frescor Urbano (IFU) refere-se à influência da vegetação na redução da temperatura em relação a da área construída envolvente. A IFU considera o papel da vegetação nas trocas radiativas e no processo de resfriamento evaporativo entre a superfície sombreada e a superfície adjacente (Spronken-Smith e Oke, 1998), que entre outros benefícios ecossistêmicos, ajuda a mitigar os efeitos negativos da ICU (Akbari et al., 2016). Inúmeros trabalhos têm evidenciado, em diferentes contextos climáticos, a redução da temperatura do ar pela influência da vegetação (Dimoudi e Nikolopoulou, 2003; Bowler et al., 2010; Gómez-Muñoz et al., 2010). Num estudo climático em Lisboa, Andrade e Vieira (2005) demonstraram que o espaço verde foi mais fresco do que a área envolvente ao longo do dia, variando entre 1.0°C e 1.5°C com extremos a atingir 9 °C. Nesse mesmo estudo, verificou-se que os locais no interior do Jardim (Fundação Calouste Gulbenkian) foram sempre mais frescos do que os do exterior: ao sol, a diferença foi de 2°C a 3°C e, à sombra, atingiu 5°C. Mesmo um pequeno parque urbano (0.24 ha) pode influenciar significativamente o ambiente envolvente com a redução da temperatura até 6.9°C (Oliveira et al., 2011) ou mesmo uma simples árvore tem a capacidade de gerar sensação de conforto térmico no seu entorno imediato (Abreu-Harbach et al., 2015).

No entanto, a combinação de fatores como o tamanho, tipo e composição da vegetação, fatores geográficos e variáveis meteorológicas influencia no potencial efeito dos espaços verdes na temperatura (Upmanis e Chen 1999; Doick e Hutchings, 2013), inclusive pode até provocar o efeito indesejável, tornando-os, por vezes, mais aquecido do que a área envolvente. Em Tel Aviv-Israel, Potchter et al., (2006) observaram que os parques com relva e poucas árvores estiveram mais aquecidos do que as áreas construídas. Em Taipei, capital de Taiwan, Chang et. al., (2007) analisando 61 parques verificaram que aproximadamente 1/5 deles foi mais quente que a sua área construída envolvente e os parques onde as superfícies pavimentadas, que representaram igual ou mais que 50% da cobertura, foram mais quentes do que a sua vizinhança. Além disso, como foi observado por Jauregui (1991-1992) na Cidade do México, a diferença de temperatura entre o parque e a área construída anula-se ou torna-se insignificante especialmente durante o período diurno.

Além da temperatura, o espaço verde também modifica o comportamento de parâmetros atmosféricos que influenciam o balanço energético do corpo humano tais como a temperatura radiativa média (a soma de todas radiações sobre o corpo humano), a velocidade do vento e a umidade (relativa e absoluta) refletindo na saúde e no conforto térmico (Yu e Chen, 2006; Zoulia et al., 2009; Oliveira et al., 2011). Assim, o monitoramento climatológico urbano por um tempo suficientemente longo também é fundamental para entender melhor a intensidade da IFU, a função benéfica dos espaços verdes dentro da cidade, bem como avaliar o grau de eventuais inconvenientes climáticos advindos de suas características (quedas e alergias causadas por polens).

1.4 A influência da brisa marítima na ICU

Se a brisa marítima se desenvolve perto de uma cidade costeira, ela interage inevitavelmente de vários modos com a ICU. Nesse sentido, alguns trabalhos (Yoshikado, 1992 por exemplo) sugerem que a presença da ICU aumenta a velocidade da brisa do mar durante o dia, enquanto outros (por exemplo Freitas et al., 2007) mostraram que a interação entre as circulações geradas pela ICU e a circulação de brisa marítima produz correntes ascendentes mais intensas. Adicionalmente, inúmeros estudos têm demonstrado que a interação da brisa marítima com a ICU desempenha um papel importante na amenização do estresse térmico com a chegada de ar mais fresco do mar (Emmanuel e Johansson, 2006; Papanastasiou et al., 2010; Lopes et. al., 2012) além do importante impacto sobre a difusão e a dispersão da poluição do ar (Muller et al., 2003).

O que se coloca em questão é que, com avanço da brisa marítima, espera-se uma redução da temperatura e um aumento da umidade relativa, e isso pode reduzir as diferenças de temperatura urbano-rural, como sugeriram os estudos para as regiões do Busan (Kim e Baik, 2004), Nova Iorque (Gedzelman et. al., 2003) e Dublin (Graham, 1993). No entanto, no capítulo 1 foi demonstrado que o desenvolvimento da frente de brisa marítima na região do Estado de Sergipe está relacionado com os dias mais quentes devido às condições meteorológicas logo após a passagem da frente de brisa, o que poderá, entre outros efeitos, potencializar a intensidade da ICU. Neste estudo, explorou-se a relação entre a frente de brisa e as intensidades da ICU e IFU.

2 Objetivos

Este estudo foca especialmente as diferenças térmicas intra-urbanas para examinar a ICU e IFU. Para isso, os seguintes objetivos específicos procuraram:

- Confirmar a existência de climas locais, baseando-se nos desvios térmicos entre as estações urbanas.
- Avaliar as intensidades da ICU e da IFU bem como a frequência com que esses fenômenos se manifestam;
- Analisar a relação entre a velocidade do vento e as condições de céu com as intensidades da ICU e da IFU;
- Avaliar a relação entre a frente de brisa marítima e as intensidades da ICU e da IFU.

Como resultado desses objetivos, várias hipóteses podem ser deduzidas:

- Existem diferenças expressivas de temperatura intraurbana em Aracaju?
- A vegetação urbana desempenha um papel relevante no contexto climático local?
- A ICU e IFU são influenciadas pela frente de brisa marítima?

3 Materiais e métodos

Stewart (2011) sugeriu critérios essenciais para a melhoria da qualidade metodológica da ICU os quais englobam, basicamente, os efeitos urbanos e não urbanos (por exemplo, condições de tempo, topografia, influência de corpos d'água e ventilação natural) sobre a temperatura. Assim, numa perspectiva de

planejamento urbano, este estudo sobre a ICU e a IFU tenta contemplar os critérios de Stewart por meio dos procedimentos metodológicos que a seguir se enunciam.

3.1 Conjunto de dados

Os dados climatológicos horários (UCT) usados neste estudo são da RCU referentes ao período de 19 de Julho de 2014 a 30 de Julho de 2016 (referenciado a partir daqui adiante como 2014-2016). O Tabela 6 sintetiza todas as variáveis usadas e seus respectivos objetivos.

Tabela 6: Objetivos do estudo, variáveis e as estações urbanas usadas.

| Variável | Unidade de medida | Estação meteorológica | Objetivo |
|---------------------|------------------------|-----------------------|--|
| Temperatura do ar | (°C) | RCU | Analisar as temperaturas intra-urbanas; Definir a ICU e IFU |
| Umidade relativa | (%) | RCU | |
| Umidade absoluta | (g/kg) | RCU | |
| Direção do vento | (°) | Aeroporto (Infraero) | Avaliar a relação entre vento e intensidades da ICU e IFU |
| Velocidade do vento | ms ⁻¹ | Aeroporto (Infraero) | |
| Condições de céu | --- | Aeroporto (Infraero) | Avaliar a relação entre as condições de céu e as intensidades da ICU e IFU |
| Radiação solar | kJ m ⁻² | INMET | Analisar o impacto da brisa marítima sobre o ICU e IFU Obs: dados referentes à brisa marítima ver capítulo 1. |
| Nebulosidade | Oitavas de céu coberto | INMET | |

3.2 Análise da diferença de temperatura intraurbana: desvios térmicos

Para analisar os desvios térmicos, assumiu-se como estação urbana de referência a Zona de Expansão para representar o comportamento térmico da área periurbana em relação as demais áreas da cidade. O cálculo dos desvios térmicos (ΔT) segue:

$$\Delta T = T_{xn} - T_{ze} \quad (4)$$

em que se subtraíram as diferenças térmicas entre todos os pontos de observação (T_{xn}) em relação à Zona de Expansão (T_{ze}). Os desvios térmicos foram analisados pela variação horária sazonal e as frequências no período diurno e noturno.

3.3 Definição das intensidades da ICU e IFU

A arquitetura da RCU permitiu avaliar as intensidades da ICU e a IFU em Aracaju de acordo com a abordagem $\Delta T_{u_{\text{grupo}}} - r_{\text{grupo}}$. Para isso, foi utilizado o algoritmo Classificação Hierárquica (*Cluster Analysis*) em que as temperaturas horárias foram agrupadas na medida que as suas similaridades aumentavam. Desse modo, encontraram-se grupos de similaridades térmicas entre as estações urbanas, levando em conta a presença de espaços verdes, o enquadramento urbano (densidades), a influência de corpos d'água e a ventilação. Tais considerações orientaram ainda, pese embora a subjetividade, a divisão das estações urbanas em 3 grupos até ao nível 4 (*linkage distance*) do dendrograma na Figura 18. Formaram-se assim, o grupo 1 com edificações mais compactas na área central da cidade representado pelas estações urbanas Jardins (JAR), Centro da Cidade (CC) e Siqueira Campos (SCA), o grupo 2 com edifícios baixos e menos compactos na área periurbana da cidade representados pelas estações urbanas Zona de Expansão (ZE), Santa Maria (STM) e Praia José Sarney (PJS) e, por fim, o grupo 3, tendo a estação urbana Parque da Cidade (PC) como representativa do espaço verde (ver a formação dos grupos na Figura 19).

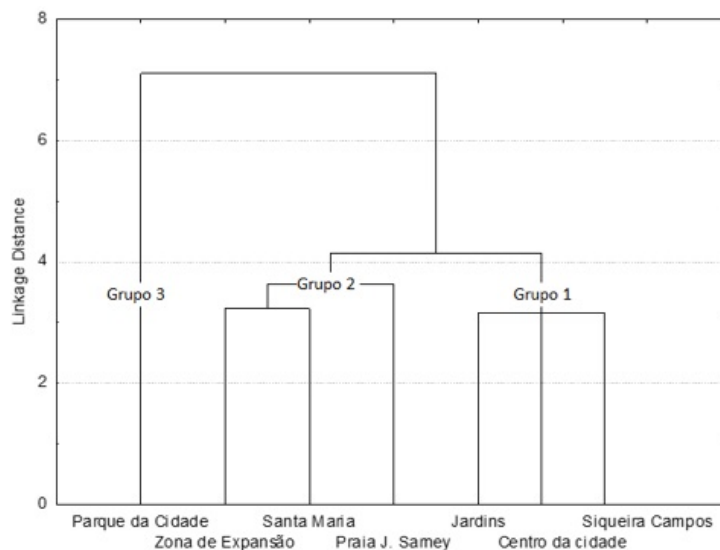


Figura 18: Grupos de similaridade térmica entre as estações urbanas no período de 2014-2016, adaptado de Anjos e Lopes (2015).

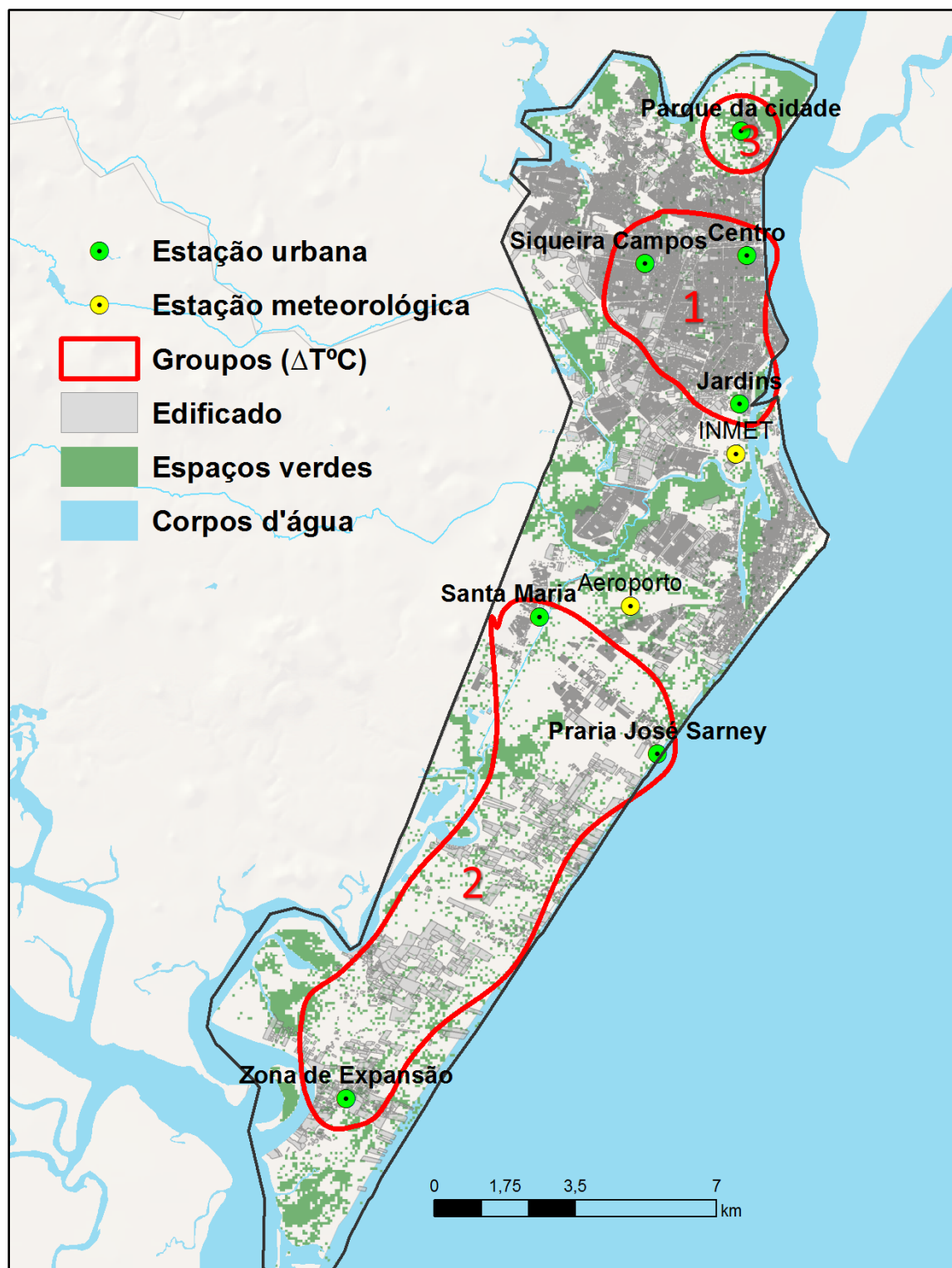


Figura 19: RCU e a definição dos grupos com similaridade térmica.

Nota: As Local Climate Zones de cada estação urbana podem ser consultadas na tabela 5 do capítulo 2 e na figura 69 do capítulo 6.

Em posse dos grupos de similaridade térmica referidos, procedeu-se o cálculo da intensidade da ICU (IICU), cujo critério foi a ocorrência, no dado momento específico, de temperaturas da área central da cidade superiores às temperaturas das áreas periurbanas. Desse modo, a IICU foi calculada conforme a seguinte equação (Lopes et al., 2013; Alcoforado et al., 2014):

$$IICU = T_u (T_{max}) - T_{pr} (T_{min}) \quad (5)$$

onde, T_u corresponde a média da temperatura máxima (horária) nos três pontos da área central da cidade (grupo 1) e T_{pr} a média de temperatura mínima (horária) nos três pontos da área periurbana (grupo 2). As médias térmicas de cada grupo foram consideradas no cálculo da intensidade da ICU para evitar que a influência microclimática de cada estação urbana predomine sobre a escala local (Andrade, 2003; Lopes et al., 2013; Alcoforado et al., 2014). Para efeito de cálculo da IICU utilizaram-se tão-somente as estações urbanas dentro da área limite de estudo. Primeiro, porque considerou as estações urbanas onde a representatividade da escala local fosse garantida, e para isso, foi dada atenção especial aos metadados, o que levou a segunda razão que é ter o controle de informações físicas e ambientais de cada estação urbana.

Seguindo a mesma lógica, a intensidade da IFU (IIFU) foi calculada (Spronken-Smith e Oke, 1998):

$$IIFU = T_u (T_{max}) - T_{pc} (T_{min}) \quad (6)$$

onde, T_{pc} é mínima horária de temperatura no PC (Grupo 3).

Para examinar o efeito sazonal e diário da IICU e IIFU, os dados horários foram divididos em estações do ano e em período diurno e noturno. O conhecimento da climatologia local (Anjos, 2012) mostra que, por definição, os verões são quentes e os invernos são suaves. Considerando as normais climatológicas 1961-1990 e, como tendo as menores temperaturas médias anuais (24-25°C) e as maiores temperaturas mínimas (22-23°C) se concentrando nos meses Junho a Setembro, definiu-se esse período como a “estação fresca” e os restantes meses (de Outubro a Março) como a “estação quente”. Similar procedimento foi usado em Taiwan por Lin (2009). A divisão em período diurno e noturno foi usada para evitar anomalias térmicas microclimáticas causadas pelo sombreamento dos edifícios e árvores próximas ao sensor (Lopes et al., 2013, p.5). O software SOLWEIG⁷ (Lindberg e Grimmond, 2010) foi usado para determinar as horas correspondentes ao

⁷ <http://gvc.gu.se/english/research/climate/urban-climate/software/solweig>

período diurno (10:00 as 20:00h UCT) e noturno (22:00 as 07:00h UTC), sendo excluídas as horas de transição entre o nascer do sol e o pôr-do-sol.

A estratificação das intensidades da ICU baseou-se nas classes de García (1996) sendo classificadas dessa forma: baixa intensidade, quando as diferenças térmicas são de até 2°C; média intensidade, quando se situam entre 2 a 4°C e forte intensidade, quando são superiores a 4°C. Para efeito de análise, a mesma classificação foi usada para avaliar a intensidade da IFU conforme a seguinte lógica: quanto mais forte é a intensidade da IFU mais forte é o efeito refrescante pelos espaços verdes em relação áreas circundantes.

3.4 Estratificação das velocidades do vento e definição das condições de nebulosidade

Para o período 2014-2016, usaram-se os dados da nebulosidade e direção e velocidade do vento para relacionar com as intensidades da ICU e IFU previamente definidas. Os dados são da estação meteorológica do Aeroporto de Santa Maria (Cod. SBAR) localizada na área periurbana por estar mais aberta a influência de eventos não urbanos, o que favorece a diminuição de erros na observação. Seis categorias de velocidade dos ventos foram definidas: $0 < x \leq 2 \text{ ms}^{-1}$; $2 < x \leq 4 \text{ ms}^{-1}$; $4 < x \leq 6 \text{ ms}^{-1}$; $6 < x \leq 8 \text{ ms}^{-1}$; $8 < x \leq 10 \text{ ms}^{-1}$; $x > 10 \text{ ms}^{-1}$. A condição de nebulosidade é descrita como a aparência do céu definida pela cobertura de nuvens observadas pela estação meteorológica. Quatro tipos de condições de nebulosidade foram definidos⁸: *céu limpo* (0 oitavos); *parcialmente nublado* (de 1/8 a 4/8); *muito nublado* (de 5/8 a 7/8) e *céu totalmente encoberto* (8).

3.5 Dados da frente de brisa marítima

A análise da relação entre a frente de brisa e as intensidades da ICU e IFU decorreu por meio da variação diária (00:00h a 23:00h - UTC) entre tais intensidades nos *dias com FBM* e nos *dias sem FBM*, restringindo-se ao verão 2015.

⁸Critérios adaptados da previsão do tempo fornecida pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CEPTC, do FEDERAL METEOROLOGICAL HANDBOOK No. 1 – FMH1/OFCM/2005 e da Organização Mundial de Meteorologia – OMM.

4 Resultados

4.1 Variação diária da temperatura e umidade relativa

O curso diário sazonal da temperatura nas setes estações urbanas segue com os valores médios mínimos ocorrendo às 09:00h e os máximos às 16:00h (Figura 20 (a,b)). Na *estação quente*, Parque da Cidade (localizada a norte) apresentou a máxima média de temperatura dentre as demais estações urbanas (30°C) às 15:00h e registrado a maior mínima de temperatura (24.7°C) às 09:00h (Figura 20 (a)). Além disso, durante as tardes quentes, a estação urbana Praia José Sarney (localizada à beira do mar) seguiu apresentando as menores médias de temperatura (28.5°C), creditando a contribuição oceânica na amenização das temperaturas diurnas.

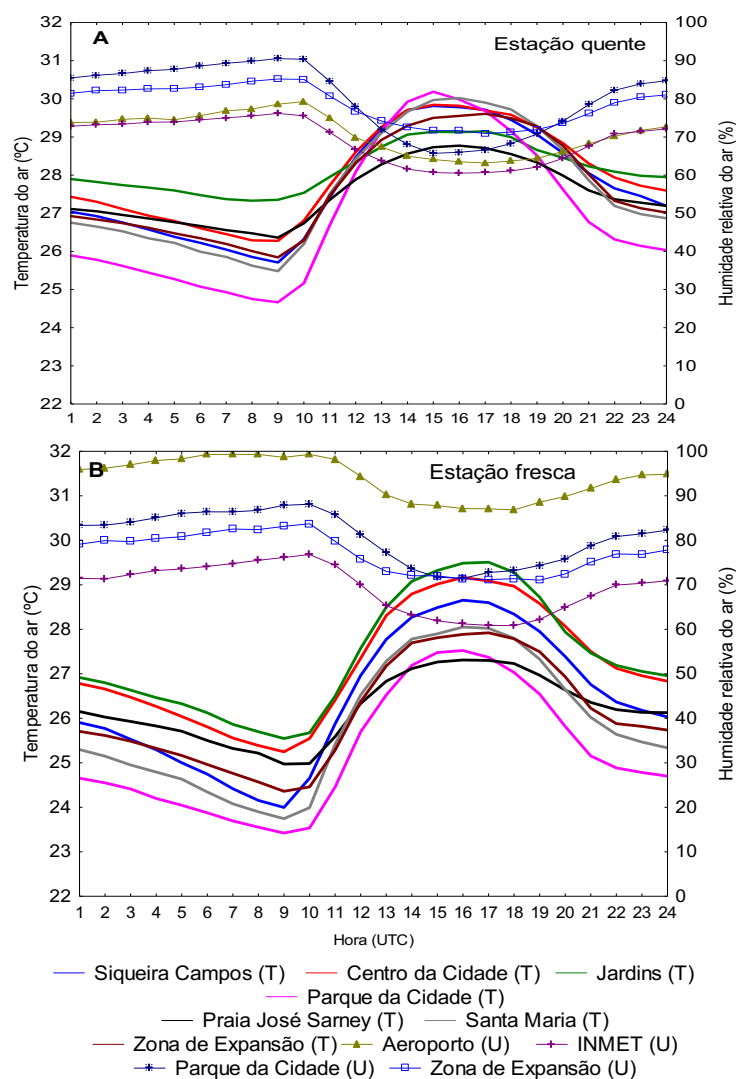


Figura 20: Média horária sazonal da temperatura e umidade relativa de sete estações urbanas e duas estações meteorológicas no período 2014-2016.

Por outro lado, a *estação fresca* deixou mais nítida a diferença térmica entre cada estrutura urbana, tendo as estações das áreas centrais da cidade registado os maiores valores de temperatura (entorno de 29.2°C para Jardins às 16:00h) em relação às estações das áreas periurbanas (27.8°C para Zona de Expansão às 16:00h) (Figura 20 (b)). Parque da Cidade e Praia José Sarney permaneceram com os menores valores de temperatura (ambas com 27.2°C às 16:00h). Como consequência da temperatura e o ambiente marinho adjacente, os valores médios da umidade relativa refletem o caráter úmido da atmosfera urbana local. Na *estação quente*, os valores variaram entre a máxima de 90% às 10:00h (Parque da Cidade) e a mínima de 60% às 16:00h (INMET), enquanto na *estação fresca* os valores médios da umidade relativa aumentaram significativamente (entre 100% a 80% para o Aeroporto) (Figura 20 (a,b)).

4.2 Desvios térmicos: variação horária sazonal e frequências relativas

A média horária sazonal dos desvios de temperatura da ZE (representativa da área periurbana) em relação às demais estações urbanas está representada na Figura 21. Os resultados indicam que não houve grandes diferenças térmicas em relação a ZE variando de modo geral entre 2°C a -1°C. Um padrão térmico foi observado durante o período entre o início da noite até o início da manhã (22:00-10:00h) quando se destacaram a JAR com desvios térmicos positivos de 1,5°C e máximo de 2°C e PC com desvios térmicos negativos de -1°C. Outro padrão térmico foi observado nas proximidades do mar representado pela PJS, onde ocorreu tendência de arrefecimento com desvios até -1°C no final da manhã e toda a tarde (12:00 e 19:00h), momento no qual os desvios térmicos de todas as estações urbanas uniram-se entorno de 0°C.

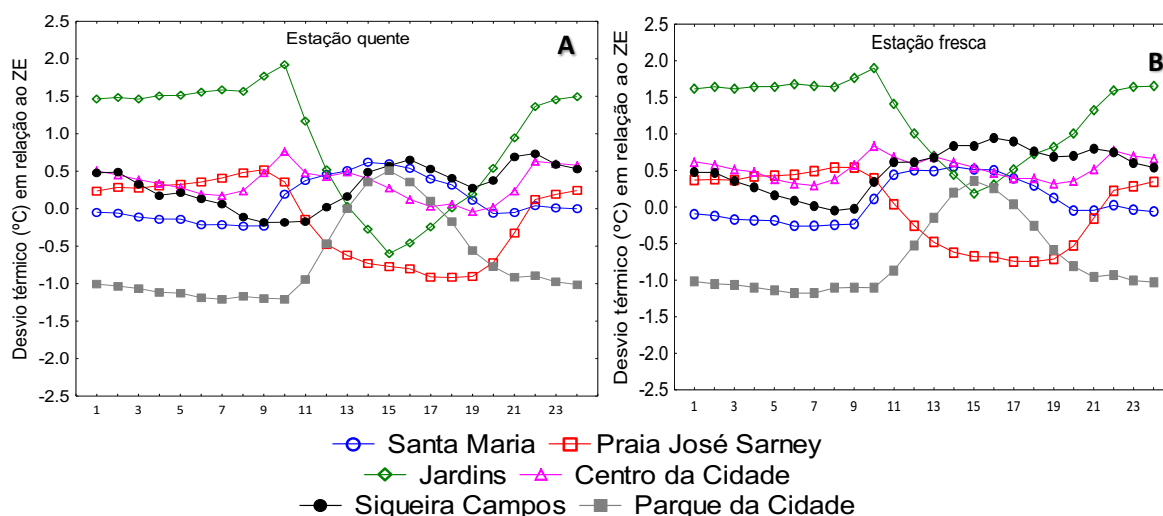


Figura 21: Desvios térmicos horários das estações urbanas em relação à Zona de Expansão referente a estação quente (A) e a estação fresca (B) no período 2014-2016.

Com relação às frequências relativas, as estações representativas das áreas com densidades urbanas mais elevadas, SCA (80%), CC (70%) e JAR (50%) apresentaram os maiores valores na classe ($0^{\circ}\text{C} < \Delta T < 2^{\circ}\text{C}$) relativamente à ZE nos diurno e noturno (Figura 22). Em ambos os períodos, JAR obteve na classe ($< 2^{\circ}\text{C} \Delta T < 4^{\circ}\text{C}$) as maiores frequências (30%) entre as demais estações. Nas áreas com densidades menos elevadas, contudo, as classes dominantes foram ($0^{\circ}\text{C} < \Delta T < 2^{\circ}\text{C}$) e ($< -2^{\circ}\text{C} \Delta T < 0^{\circ}\text{C}$), tendo PJS os maiores valores 80% noturno e 70% diurno em ambas classes, seguido pela STM com 60%. A classe ($< -2^{\circ}\text{C} \Delta T < 0^{\circ}\text{C}$) foi onde a PC apresentou valores acima de 60% no diurno e noturno, como aliás, foi ela a única estação urbana em que os valores ocorreram frequentemente próximo dos 10% na classe ($< -4^{\circ}\text{C} \Delta T < -2^{\circ}\text{C}$). Para o conjunto da análise, as frequências dos desvios térmicos nas classes dos extremos ($> 4^{\circ}\text{C}$) e ($< -4^{\circ}\text{C}$) não se mostraram expressivas em relação à ZE.

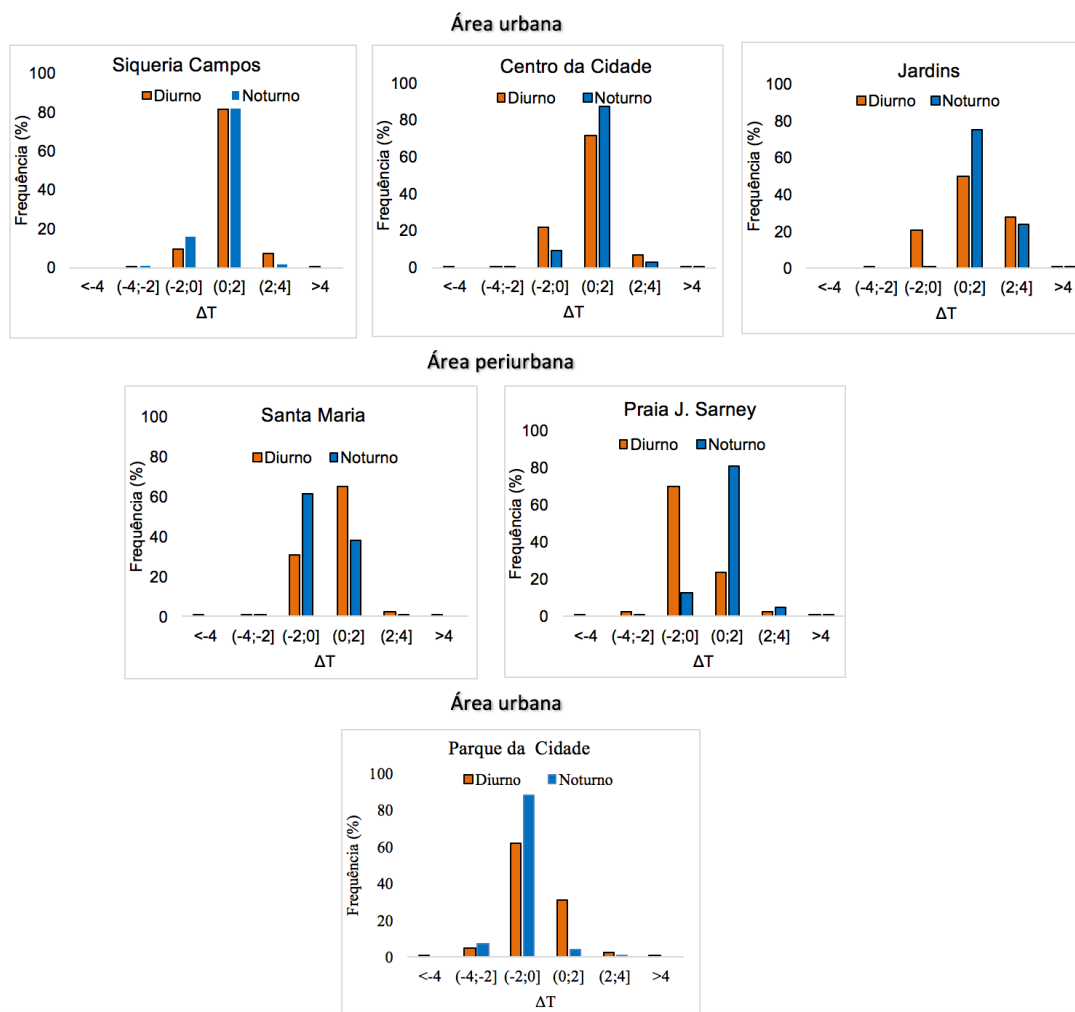


Figura 22: Frequências relativas dos desvios térmicos das estações urbanas em relação à Zona de Expansão no período de 2014-2016.

4.3 Estatística das intensidades da ICU e IFU

4.3.1 Síntese da série analisada

A síntese das intensidades da ICU e IFU é ilustrada na Figura 23 (a)(b). Em tal síntese, nota-se que a IICU não ultrapassou 1°C em ambos turnos diurno e noturno entre 25% a 75% das observações. A média e mediana da IICU ao redor de 1°C revelam o caráter pouco marcado desse fenómeno. Foram observados os extremos máximos da IICU de 5.5°C e mínimos de -3.3°C pelo dia e máximos 3.5°C e mínimos de -2°C pela noite. Enquanto a IIFU, contudo, obteve um grau médio a mais do que a IICU variando de 1°C a 2°C entre 25% a 75% das observações. A intensidade média e mediana da IFU juntas ficaram próximas dos 2°C e foram observadas a intensidade máxima de 6.6°C e mínima de -2.6°C diurno e 4°C e -1°C noturno.

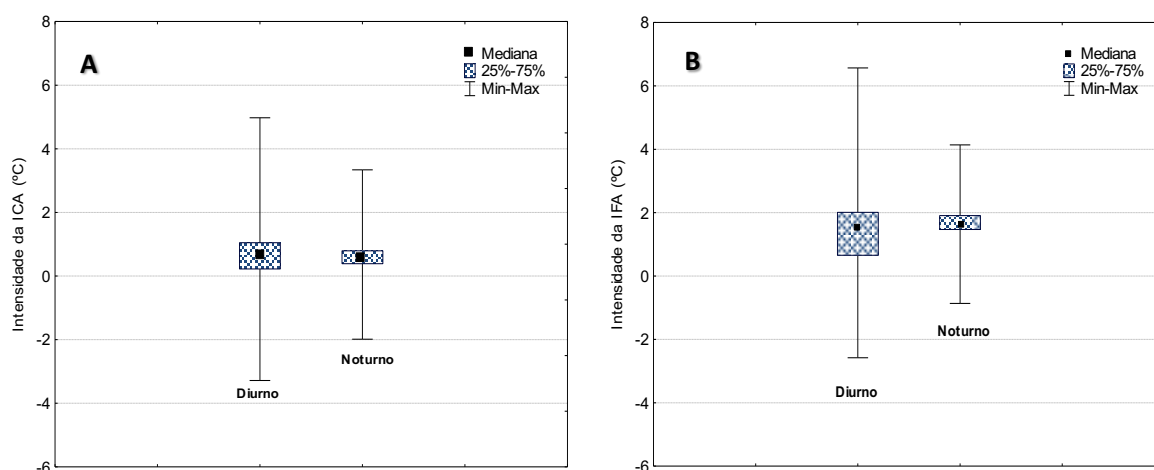


Figura 23: Síntese da série completa das intensidades da ICU (A) e da IFU (B) referente ao período de 2014-2016.

4.3.2 Frequências relativas

Na Figura 24 apresentam-se as frequências relativas da distribuição diurna e noturna sazonais da IICU e IIFU para o período de estudo. Na estação quente, as maiores frequências da IICU (>87%) ocorreram invariavelmente na classe *baixa intensidade* (diferença térmica de até 2°C) nos dois períodos analisados (Figura 24ab). A classe *intensidade média* (2°C a 4°C) da ICU registrou apenas 2% no diurno e não se observou nenhuma ocorrência no noturno (noites quentes). Na *estação fresca*, as frequências da classe *baixa intensidade* da ICU permaneceu estável entorno de 80%, embora houvesse um aumento na classe *intensidade média* próximos dos 20%. As frequências de *forte intensidade* da ICU (> 4°C) não ocorreram em nenhum momento do

período analisado. Esses resultados sugerem que não há uma distinção clara se o carácter é eminentemente diurno ou noturno da ICU, exceto nos extremos.

No que diz respeito às frequências relativas da IIFU, a classe *baixa intensidade* (até 2°C) foi a mais predominante (entre 50% a 90%) nas duas estações do ano e para ambos os turnos (Figura 24bc). As frequências da classe *média intensidade* da IFU (2°C a 4°C) obtiveram maior expressividade na *estação fresca* variando entre 22% diurno e 45% noturno bem como apresentou uma diminuição nas frequências durante a *estação quente* com 12% no diurno e 7% no noturno. A *forte intensidade* da IFU (> 4°C) ocorreu apenas 2% durante os dias na *estação fresca* não ocorreu na *estação quente*. Deve-se lembrar que quanto maior a intensidade da IFU maior é a redução da temperatura pela influência do espaço verde em relação às áreas centrais da cidade.

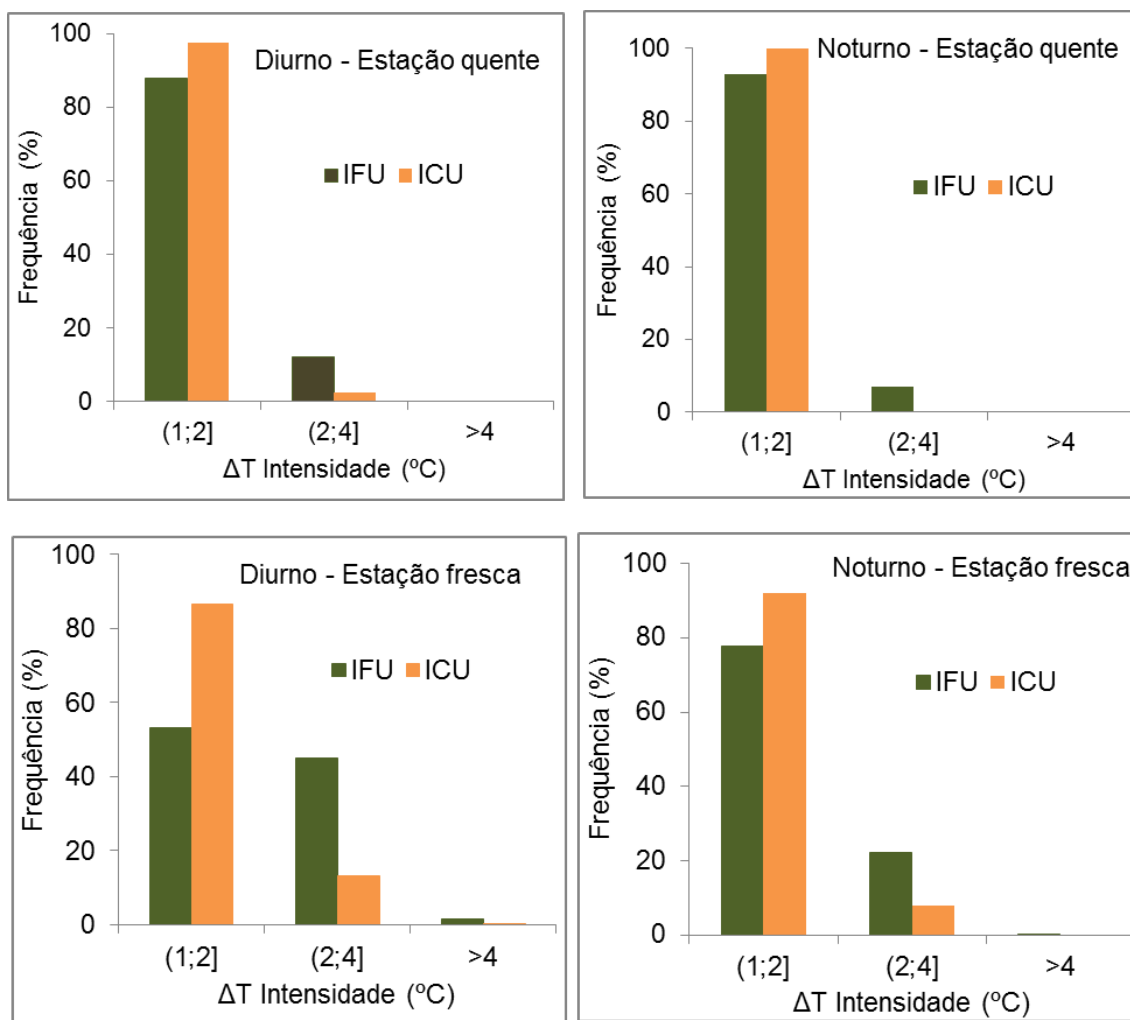


Figura 24: Frequência sazonal das intensidades da ICU (A) e IFU (B) durante o período diurno (10:00-20:00h) e noturno (22:00-07:00h) entre 2014-2016.

4.3.3 Número de observações iguais ou superiores a 2°C

De fato, tem-se observado uma enorme diferença entre as intensidades da ICU e da IFU sobretudo se se levar em conta o número total de observações em que as intensidades foram iguais ou superiores a 2°C (Figura 25). Isso é particularmente importante, uma vez que, intensidades maiores do que 2°C têm efeito no conforto bioclimático. No total de 15.640 casos observados, a IICU $\geq 2^\circ\text{C}$ ocorreu em 435 casos e, distribuídos em cada hora do dia, os casos da ICU não ultrapassam 40 casos. Verificou-se um pequeno aumento no número de observações da IICU no período entre as 09:00h e as 18:00h, que somados, contudo, não chegaram a 200 casos. A IIFU registrou um total de 3.774 casos em que, vale dizer, o efeito refrescante do espaço verde se fez presente em relação às áreas centrais da cidade. Esse efeito da IIFU manteve-se numa certa regularidade no número de observações ao longo do dia variando acima de 100 casos inclusive com o máximo de 285 às 10:00h. Porém, foi observado entre as 11:00h até as 19:00h um declínio acentuado no número de observações da IFU $\geq 2^\circ\text{C}$ com o mínimo de 88 casos (Figura 25).

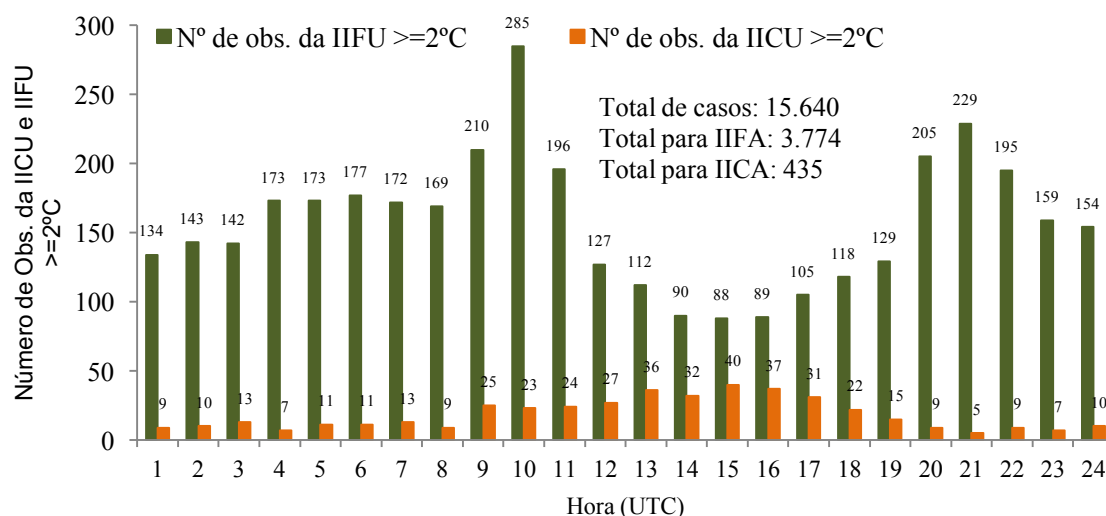


Figura 25: Média horária e número de observações maiores ou iguais a 2°C das intensidades da ICU e IFU no período 2014-2016.

4.3.4 Relação entre as intensidades da ICU e IFU e a velocidade do vento

A variação diurna da intensidade da ICU e IFU e a relação com velocidade do vento está indicada na Figura 25. Na *estação quente*, a média da IICU ficou estável próximo dos 0.5°C o que indica um tímido aquecimento das áreas centrais em relação às áreas periurbanas. Ao passo, que a média da IIFU foi mais expressiva do que a IICU com valores mantiveram-se em 1,7°C

durante a noite até manhã (20:00-12:00h) e com pico de 2°C registrado às 09:00h. O fato é que, durante a tarde com a aumento da velocidade média do vento partir das 11:00h e máximo 6 ms⁻¹ às 17:00h os valores médios da IIFU declinaram bruscamente até 0°C (Figura 25 (a)). Na *estação fresca*, todavia, as médias da IICU aumentaram a partir das 11:00h com a máxima de 1.3°C às 15:00h causada pela diminuição das médias das velocidades do vento em relação à *estação quente*. Nessa situação, ao contrário da *estação quente*, a IIFU manteve-se estável entre 1.5°C e 2°C ao longo do dia (Figura 25 (b)).

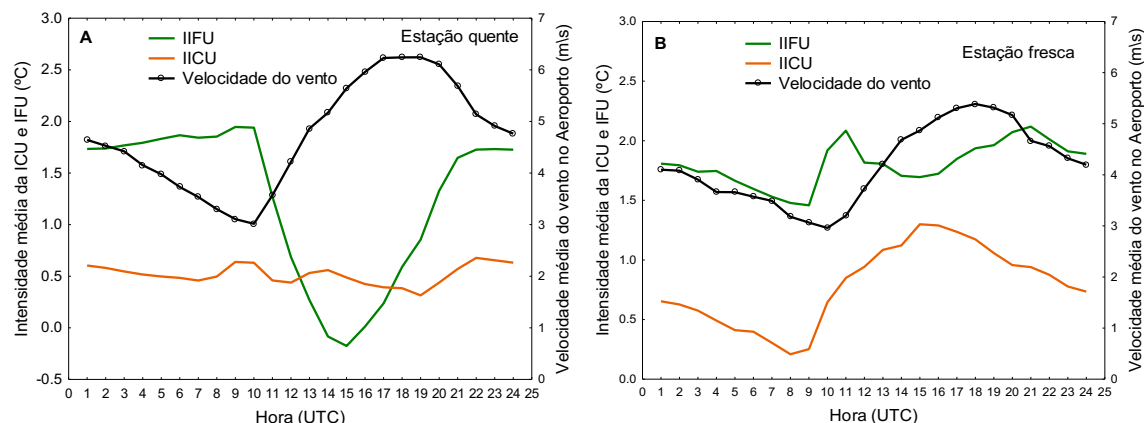


Figura 26: Média horária das intensidades da ICU e IFU e da velocidade do vento no período 2014-2016.

A estratificação da velocidade dos ventos e os correspondentes valores de intensidade média da ICU e IFU são apresentados na Tabela 7 e na Figura 27. A classe de *vento fraco* (até 2 ms⁻¹) representou apenas 5,5% das observações o que corresponde a 905 das ocorrências de um total de 15.640 analisadas. Esta classe é particularmente importante de ser analisada, pois ela representa, segundo a literatura especializada, parte das condições anticiclônicas responsáveis por potencializar as intensidades ICU. Nessa classe foi observada a intensidade média de 0.7°C para ICU e 1.6°C para a intensidade da IFU. De fato, a situação de velocidades do vento mais frequentes em Aracaju foi a classe 4 a 6 ms⁻¹ que corresponde a 44.5% das ocorrências, seguida pela classe de 2 a 4 ms⁻¹ com 22% e a de 6 a 8 ms⁻¹ com 21%. Nessas classes foi observado a intensidade média de até 0.6°C da ICU e de até 1.7°C da IIFU. Ao passo que, as classes de maiores velocidades do vento 8 a 12 ms⁻¹ e >10 ms⁻¹ se, somadas, representam apenas 2% das ocorrências, observando nelas uma redução da IIFU próxima a 0°C.

Tabela 7: Estatística básica das classes de velocidade do vento em Aracaju e a correspondente intensidade média da ICU e IFU no período 2014-2016.

| Velocidade do vento (ms^{-1}) | | | Intensidade média ($^{\circ}\text{C}$) | |
|---|-------------------|--------------------|---|-----|
| Classe | Nº. de observação | Freq. Relativa (%) | ICU | IFU |
| $0 < x \leq 2$ | 905 | 5,5 | 0.7 | 1.6 |
| $2 < x \leq 4$ | 3468 | 22 | 0.6 | 1.7 |
| $4 < x \leq 6$ | 7001 | 44,5 | 0.6 | 1.5 |
| $6 < x \leq 8$ | 3308 | 21 | 0.6 | 1.1 |
| $8 < x \leq 10$ | 310 | 2 | 0.4 | 0.6 |
| > 10 | 4 | 0 | 0.3 | 0.3 |
| Casos não analisados | 645 | 4,12 | -- | -- |
| Total | 15640 | 100 | -- | -- |

A Figura 27 (a) mostra que as intensidades da ICU ocorreu quase que invariavelmente em todas velocidades do vento. Isso indica que as intensidades da ICU não se manifestaram somente em condições de atmosfera com vento fraco (e calma), como aliás, as intensidades mais fortes da ICU tenham sido observadas entre ventos de 4 a 6 ms^{-1} . A Figura 27 (b) mostra que as intensidades da IFU seguiram a mesma tendência da ICU concentrando entre os ventos prevalentes de 4 a 6 ms^{-1} . A diminuição, contudo, nos valores de intensidades da ICU ocorreram em ventos a partir 7 ms^{-1} e da IFU exceto a partir 9 ms^{-1} .

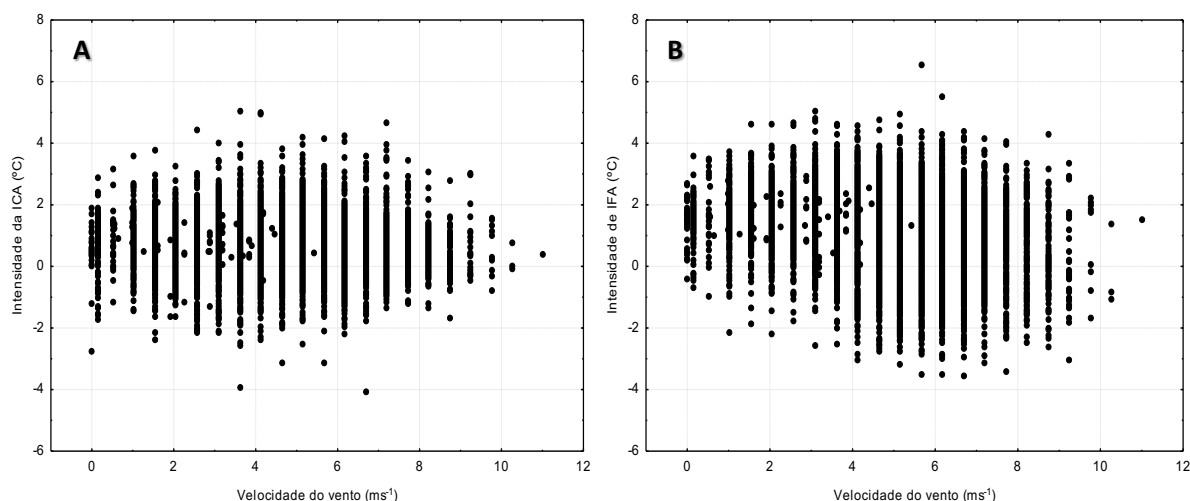


Figura 27: Distribuição dos valores de intensidade da (A) ICU e (B) IFU de acordo com a velocidade do vento no período 2014-2016.

4.3.5 Relação entre as intensidades da ICU e IFU e a nebulosidade

A

Tabela 8 mostra que as condições de nebulosidade mais atuantes em Aracaju foram marcadamente o *parcialmente nublado* (79,6% ou 11.942 casos),

seguido pelo *muito nublado* (10.42%) e *céu limpo* (4.64%). Nessas condições de céu, a IICU e IIFU ao redor de 0.6°C e 1.4°C foram registradas, respectivamente. Na categoria *céu totalmente encoberto* (0% - 4 casos) registrou e menor IICU de 0.2°C e a maior IIFU de 2°C. Em relação a distribuição das intensidades da ICU e IFU em associação com as condições de céu, a figura mostra que a principal diferença de temperatura (contrastes térmicos positivos e negativos) entre a área central da cidade e a periurbana bem como àquela em relação ao parque da cidade ocorreram nas categorias *parcialmente nublado* e *muito nublado*.

Tabela 8: Estatística básica das categorias das condições sinóticas de tempo em Aracaju e a correspondente intensidade média da ICU e da IFU durante o período 2014-2016.

| Condições de nebulosidade | | | Intensidade média (°C) | |
|---------------------------|-------------------|--------------------|------------------------|-----|
| Categoria | Nº. de observação | Freq. Relativa (%) | ICU | IFU |
| Céu Limpo | 726 | 4.6 | 0.5 | 1.2 |
| Parcialmente Nublado | 11.942 | 76 | 0.6 | 1.4 |
| Muito Nublado | 1.630 | 10 | 0.7 | 1.5 |
| Céu totalmente encoberto | 4 | 0 | 0.2 | 1.9 |
| Casos não analisados | 908 | 5.80 | -- | -- |
| Total | 15.640 | 100 | -- | -- |

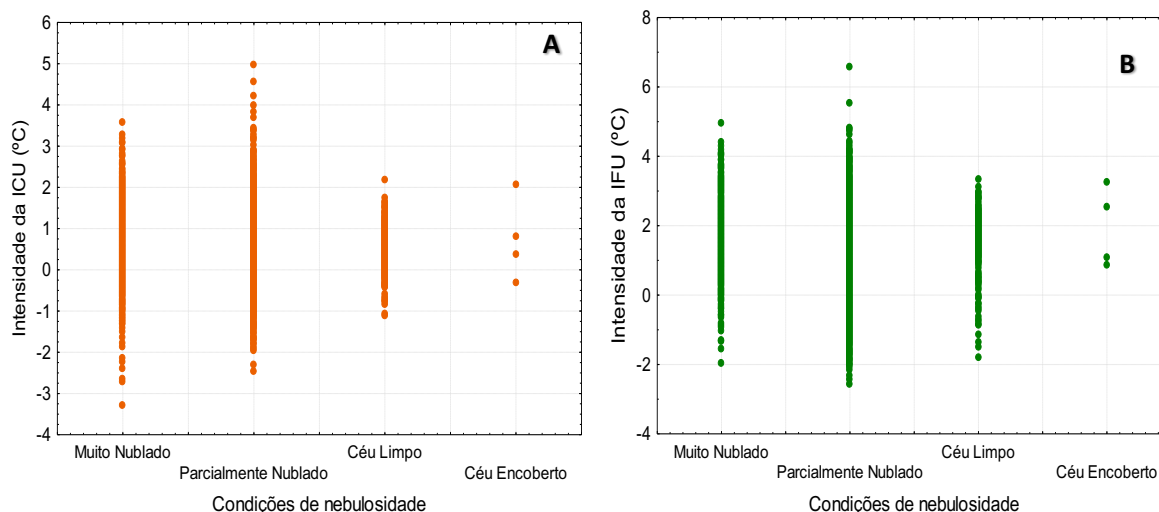


Figura 28: Distribuição dos valores de intensidade da (A) ICU e (B) IFU de acordo com a condição de nebulosidade no período 2014-2016.

5 Discussão

5.1 Climas locais

Os recentes resultados, até certo ponto, confirmam a tendência encontrada nos estudos anteriores (Anjos, 2012a, 2014ab) onde há, de fato em Aracaju, vários climas locais influenciados pela combinação mútua de fatores tais como uso e propriedades do solo, geometria urbana, espaços verdes, proximidade com corpos d'água e ventilação natural. Nesse contexto, surgem por meio da análise dos desvios térmicos das estações urbanas em relação à ZE (Figuras 20 e 21), pelo menos a formação de três principais climas locais na cidade.

O primeiro clima local pode ser notado com a estação urbana Jardins e a área por ela representada, onde a densidade de ocupação é relativamente alta e compacta. O retardamento no processo de resfriamento noturno, isto é, uma diminuição da perda de energia de ondas longas, pode explicar o aumento médio de 1.5°C na temperatura verificado durante a noite e o máximo de 2°C estendendo-se até o início do dia.

O segundo clima local observado foi representado pela estação urbana PC, onde foi possível verificar a influência do espaço verde na diminuição da temperatura (próximo de 2°C) durante a noite e início da manhã através do processo de evapotranspiração (maiores fluxos de calor latente). Muito embora, observou-se que o efeito refrescante da vegetação não foi expressivo durante a tarde, pois as diferenças térmicas tenderam a se anular. Isto devido ao um aumento verificado na temperatura média até 30°C da Parque da Cidade durante o período das tardes quentes, como ilustrou a figura 20.

O terceiro clima local foi encontrado próximo à beira-mar onde está localizada a estação urbana Praia José Sarney. Ali, as condições climáticas locais caracterizaram-se largamente pela influência de corpos d'água e pela ventilação natural onde se observou a redução das altas temperaturas principalmente durante o maior momento de aquecimento diurno.

Como vimos, a análise dos desvios térmicos determinou vários climas locais em Aracaju. Tal concepção, no entanto, não pode ser confundida com a noção da ICU adotada neste estudo, que se definiu fundamentalmente pela diferença média de temperatura representativa da área central da cidade em relação à área periurbana.

5.2 Ilha de Calor Urbano

Em geral, a ICU mostrou-se mais intensa durante a *estação fresca* do que a *estação quente*. Os resultados revelaram que durante as tardes frescas a intensidade média da ICU aumentou com o pico de 1.3°C às 1500h causada pela diminuição da velocidade média dos ventos comparados com a estação quente, cuja época do ano em que as intensidade da ICU ficaram ao redor de 0.5°C , considerada como os casos de quase-ausência da ICU. Como consequência, a classe baixa intensidade da ICU (até 2°C) foi predominante dentre as demais classes com 87% dos casos analisados. Em contraste com a ICU, esses resultados revelam fenômeno chamado *Urban Cool Island* (em inglês) com intensidade de -4°C , isto é, onde a área periurbana é mais quente que a área central da cidade. Os valores negativos da intensidade da ICU na figura 26(a) referenciam aquele fenômeno para o período 2014-2016 e que pode está associado com o rápido aquecimento sofrido pela área periurbana quando recebe a radiação solar durante o dia (Figuerola, 1998) ou pela pequena capacidade de armazenamento do calor na estrutura urbana associado ao fraco calor antrópico (Yang, 2017).

O caráter pouco marcado da ICU em Aracaju pode ser atribuído a tropicalidade costeira e ao porte da cidade. Em relação ao primeiro aspecto, a pouca variação diurna da ICU pode está relacionada à proximidade da cidade ao oceano (e estuário), pois a sua grande capacidade térmica ameniza e regula as variações de temperatura ao longo do dia (pela grande quantidade de vapor d'água que vem do oceano e se distribui nas proximidades). Isso reflecte-se na baixa amplitude térmica anual típica de região próximo ao equador (latitude 10°). Além disso, os regimes de vento nestas localidades são caracterizados pela persistência dos ventos alísios (em média de 4.7m s^{-1}) ao longo do ano, que, pela sua natureza, enaltece o papel importante do transporte de calor (ΔQA) armazenado nas superfícies, o que aliás, explica as baixas intensidades em muitas cidades tropicais (Oke et. al., 1991; Arnfield, 2003).

O pequeno porte urbano facilita, em geral, a circulação do ar sobre a cidade. As densidades urbanas relativamente baixas (vistas pelos valores de FVC) permitem que os fluxos (QH , ΔQS e o QF) sejam dissipados mais facilmente dos *canyons* urbanos, gerando na maioria dos casos baixo Q^* (balanço radiativo) entre a área urbana e área periurbana que, a somar, à condição quente e úmida da cidade, equilibra tais diferenças em termos de mistura e admitância térmica do solo (Oke et al., 1991; Arnfield, 2003; Roth, 2007). Nesse sentido, os resultados sugerem que a ICU em Aracaju é inexpressiva considerando-se como um fenômeno eminentemente noturno atribuído às diferenças de resfriamento urbano especialmente próximo ou depois do pôr-do-sol (Oke, 1982). De igual modo, sugerem que ICU é governada

muito mais pelos fatores não urbanos do que aos fatores urbanos, principalmente na estação quente.

De fato, a velocidade do vento e a nebulosidade podem afetar o desenvolvimento e intensidade da ICU em Aracaju. Foi argumentado anteriormente que a diferença de temperatura urbana-periurbana tende a se tornar mais evidente sob condições ideais tais como baixa velocidade do vento ($<1.3 \text{ ms}^{-1}$) e céu limpo. Em Aracaju, no entanto, essas condições “ideais” representam apenas 10% dos casos analisados. As intensidades da ICU incluindo os máximos ($5,5^{\circ}\text{C}$) desenvolveram-se nos ventos de 2 a 7 ms^{-1} e concentradas, em sua maioria, na classe 4 a 6 ms^{-1} (44,76%). Os resultados deste estudo estão com concordância com aqueles observados em Lisboa, onde Lopes et al., (2013) e Alcoforado et al., (2014) reportaram que as maiores frequências da intensidade da ICU, incluindo as máximas de 6°C ocorreram com ventos entre 2 a 6 ms^{-1} devido a importância do efeito de abrigo aos ventos frescos e frios de norte.

Oke e Hannell (1970) e Oke (1976) sugeriram uma velocidade crítica do vento em que as intensidades da ICU se anulam. Em Aracaju a velocidade crítica do vento foi de aproximadamente 8 ms^{-1} , cujo valor está em ordem com os de outras cidades com contexto geográfico diferente, sobretudo àquelas litorâneas onde têm registrado uma tendência para os maiores valores de velocidade crítica do vento, como mostra a Tabela 9. A comparação, todavia, deve ser levada com cautela em virtude dos vários métodos e equipamentos usados bem como o período de análise que difere de estudo para estudo.

Tabela 9: Comparação entre outras cidades referente aos valores críticos de velocidade do vento em que a ICU é desconfigurada ou anulada.

| Velocidade crítica do vento (ms^{-1}) | Cidades | Referências |
|--|----------------|------------------------------|
| 11 | Busan | Kim e Baik (2004) |
| 10 | Bueno Aires | Camilloni e Barrucand (2012) |
| 9.4 | Daegu | Kim e Baik (2004) |
| 8 | Lisboa | Lopes et. al., (2013) |
| 7.8 | Aracaju | Este estudo |
| 7 | Salamanca | Alonso et. al., (2007) |
| 7 | Seoul | Kim e Baik (2002) |
| 6.4 | Daegreon | Kim e Baik (2004) |

Além disso, a ICU desenvolveu-se mais sob a condição de céu *parcialmente nublado* (79,6%) e *muito nublado* (11%) supondo alguma

presença de nuvens (1 a 4 oitavos) na maior parte do dia. Portanto, as intensidades da ICU em Aracaju não se desenvolveram proeminentemente na “clássica” (ceu claro, baixa velocidade dos ventos) condição ideal proposta por Oke e Maxwell (1975) e Oke (1996). Como essas condições clássicas têm orientado as investigações sobre a ICU, este estudo sugere que a diferença de temperatura urbana-periurbana também pode estar em maior evidência em outras condições que não necessariamente sob a forma mais divulgada pela literatura científica.

5.3 Ilha de Frescor Urbano

A IFU, fenômeno pelo qual Oke (1987) descreveu como o “efeito oásis” existe, de fato, em Aracaju. Os resultados revelaram que a vegetação urbana desempenhou um papel importante na amenização das elevadas temperaturas do ar, significando que ela pode ser considerada no planejamento urbano como uma potencial medida para mitigar os efeitos de estresse térmico na cidade.

Em contrário da ICU, a IFU mostrou-se dinâmica com variação sazonal e diária expressivas. Notou-se que o efeito de resfriamento produzido pelo espaço verde (na estação urbana Parque da Cidade) se fez muito presente durante o período 2014-2016. De um total de 15.640 foi registrado mais de 3.700 casos em que intensidade IFU $\geq 2^{\circ}\text{C}$. Os resultados também mostraram que a intensidade máxima da IFU foi 6.6°C e a média “refrescante” variou entre 1.5°C e 2°C que está consistente, de uma certa forma, com os valores observados em outros estudos (Tabela 10).

Tabela 10: Comparação entre cidades ao redor do mundo da intensidade média da IFU consoante à dimensão do parque urbano.

| Intensidade média da IFU ($^{\circ}\text{C}$) | Dimensão do espaço verde (hectares) | Cidade | Referências |
|---|-------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| 2-3 | 500 | Cidade do México | Jareguei (1990/91) |
| 1.3-2.7 | 15 | Sacramento | Spronken – Smith e Oke (1998) |
| 1.5-2 | 93 | Aracaju | Este estudo |
| 1.76 | 24.2 | Seoul | Lee et. al., (2009) |
| 1.6 | 0.24 | Lisboa | Oliveira et. al., (2011) |
| 1-1.5 | 4.8 | Vancouver | Spronken – Smith e Oke (1998) |
| 1-2 | 0.24 | Kumamoto | Saito (1990/91) |
| 1-3 | 8.5 | Lisboa | Andrade e Vieira (2005) |

É importante observar, todavia, que a classe de *intensidade baixa* da IFU (até 2°C) foi predominante na maior parte do tempo (acima de 60%) dos

casos, mas durante a *estação fresca* a classe de *intensidade média* (até 4°C) tendeu a aumentar tanto no período diurno como noturno, a ponto de o efeito refrescante representar 45%. Aqui, deve-se ter em mente que quanto maior a intensidade da IFU maior amenização da temperatura (superfície e do ar) em relação às áreas centrais da cidade, embora este estudo tenha constatado que, nem sempre isso ocorre: durante as tardes quentes a IFU não foi observada, pois os valores negativos chegaram até -2.5°C e, fazendo alusão a IFU, tem-se o fenômeno da “Ilha de Calor Verde” (*Park Heat Island*– em inglês), isto é, onde o espaço verde é mais aquecido do que a área central da cidade. Os valores negativos da intensidade da IFU na figura 26(a) referenciam esse fenômeno para o período de 2014-2016.

Um caso semelhante foi observado em Tacubaya-México por Jauregui (1991-92), onde nas manhãs de verão o espaço verde esteve mais aquecido que área construída envolvente. No caso de Aracaju, a redução da IFU verificada na estação quente pode ser devido a uma maior atuação de ventos fortes especialmente os ventos alísios. Foi verificado durante o período entre as 10:00h-19:00h que as diferenças de temperatura entre o espaço verde e a área central da cidade reduziram drasticamente devido ao aumento da velocidade média dos ventos. Outros estudos como os de Tel Aviv (Potchter et al., 2006) e na Cidade do México (Jauregui, 1991-1992) depararam-se com a situação verificada em Aracaju: a diferença de temperatura entre o espaço verde e a área construída envolvente se anula ou torna-se insignificante durante o período diurno principalmente durante a tarde.

No caso de Aracaju, deve-se salientar, que as medições da estação urbana PC, assim como as demais, foram tomadas para evitar o sombreamento não só dos edifícios, mas também de árvores e, como tal, todos os sensores estão expostos à radiação solar. Como demonstraram Andrade e Vieira (2005), a exposição à radiação solar é responsável pelas maiores diferenças térmicas dentro do espaço verde, nomeadamente entre os locais à sombra (mais frescos, onde a redução da radiação que chega à superfície, debaixo das copas das árvores pode chegar até 97%) e os locais ao sol (mais quentes). Soma-se a isso, o fato que os sensores estão expostos a ação diferente dos ventos. A propriedade da superfície e a rugosidade dos elementos podem estar relacionadas com o aquecimento térmico no espaço verde como apontaram os estudos de Potchter et. al., (2006) e Chang et. al. (2007) citados anteriormente.

Tal como as de IICU, as intensidades da IFU não se desenvolveram somente em condições anticiclônicas “ideais” já referenciadas, contrariando a ideia de estudos que apontam para o fato que os maiores contrastes térmicos espaciais que envolve o espaço verde e a área construída verificam-se naquelas condições (por exemplo Upmanis, et al., 1998). Os resultados revelaram,

todavia, que a maioria dos valores de intensidade da IFU concentrou-se nas condições de céu *parcialmente nublado* e *muito nublado*, como aliás tenderam a aumentar com as velocidades dos ventos cujo valor máximo de 6.6°C foi observado em ventos 4 a 6 ms^{-1} .

5.4 A relação entre a ICU e IFU e a frente de brisa marítima

Este tema já foi abordado no capítulo 1, acresce aqui o fato que não foi observado claramente uma influência da frente de brisa marítima no comportamento da ICU durante o verão 2015, uma vez que as intensidades não alteraram quer nos *dias com brisa* quer nos *dias sem brisa* (Figura 29 (a)). O caráter pouco dinâmico da ICU associado à dinâmica dos ventos na cidade leva a entender que a frente de brisa marítima não altera a diferença de temperatura urbano- periurbana considerada neste estudo.

No que diz respeito à IFU, ao contrário, observou-se que nos *dias com brisa* houve uma diminuição nas intensidades a ponto de anular-se às 14:00h (Figura 29 (b)). Dito noutras palavras, o impacto da frente de brisa marítima potencializou a redução do efeito refrescante produzido pelo espaço verde em relação à área central da cidade.

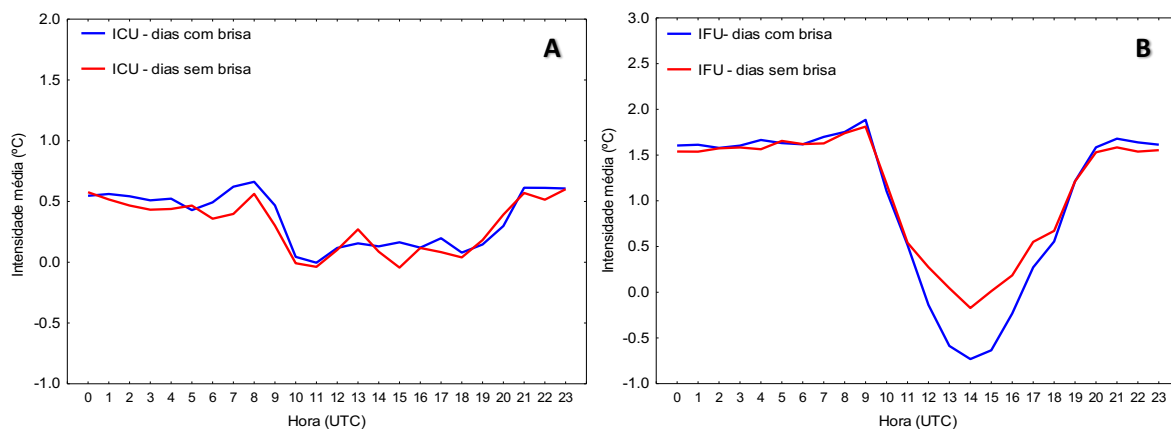


Figura 29: Comparação das intensidades da ICU (A) e IFU (B) nos dias com brisa marítima e nos dias sem brisa marítima no verão 2015.

5.5 Limitações

Este estudo apresenta algumas limitações as quais devem ser superadas a partir dos estudos mais aprofundados:

- Do balanço energético urbano local;
- Da ICU da Atmosfera Urbana Superior e superfície;
- Das características de vegetação urbana (morfologia do parque, escala do efeito refrescante, benefícios sociais, econômicos e ambientais).

6 Conclusão

Atualmente, sabe-se que existem climas locais na cidade influenciados pelos espaços verdes, proximidades com corpos d'água e densidade elevada de ocupação. Mas, ao mesmo tempo, a ICU em Aracaju, tanto diurna como noturna, não é expressiva em termos médios (entorno de $0,5^{\circ}\text{C}$) na estação quente, enquanto na estação fresca a intensidade da ICU foi consideravelmente significativa registrando até $1,3^{\circ}\text{C}$ no período da tarde. Isto demonstra que os padrões térmicos locais são influenciados sobretudo pela ventilação. Os ventos alísios foram determinantes na natureza aparentemente dinâmica da ICU, de modo que, se aumenta a velocidade média dos ventos, as intensidades da ICU diminuíram e vice-versa. Os resultados sobre a ICU foram baseados nos dados da RCU o que permitiu (i) desenvolver uma metodologia adequada para medir a intensidade da ICU, em que a representatividade escalar (local) fosse garantida por meio do grupo de estações urbanas com similaridade térmica (grupos 1, 2 e 3), ao invés de considerá-la apenas por comparar uma estação da área urbana e outra da área periurbana; (ii) permitiu atualizar e lançar generalizações a respeito da ICU em Aracaju.

Foi revelado que o efeito refrescante produzido pelo espaço verde e representado pela IFU teve impacto substancial no ambiente urbano local, que correspondeu a redução média da temperatura entre $1,5$ a 2°C em relação à área central da cidade. Aqui, há uma vantagem aparente em termos de benefícios dos espaços verdes para a melhoria do conforto térmico em que os tomadores de decisão devem ter em mente durante o processo de criação de áreas mais aprazíveis do ponto de vista térmico.

Outro achado importante encontrado neste estudo foi a constatação de que a ICU bem como a IFU não se desenvolveram tão-somente em condições anticiclônicas “clássicas” (céu claro e baixa velocidade do vento) que são favoráveis à sua gênese. De fato, as intensidades desses fenômenos distribuíram-se regularmente em condições opostas àquelas, nomeadamente entre ventos que vão de 4 a 6 ms^{-1} e céu de *parcialmente nublado* a *muito nublado*.

No primeiro ensaio da influência da frente de brisa marítima nos padrões térmicos locais em Aracaju, demonstrou-se que não houve influência na intensidade da ICU como era esperado. Ao contrário, verificou-se que com a IFU as intensidades diminuíram no período da tarde até o nulo e valores negativos durante os dias com frente de brisa.

PARTE 2: AVALIAÇÃO BIOCLIMÁTICA

Capítulo 4: Avaliação do conforto térmico

1 Introdução

Este estudo foi a primeira tentativa para entender o bioclima de Aracaju através da avaliação do conforto térmico em espaço aberto (*outdoor*) que é importantes para a habitabilidade urbana, pois nesses espaços urbanos acomodam-se o tráfego de pedestres e várias atividades ao ar livre.

O conforto é melhor definido como a ausência de desconforto no qual a pessoa sente quando está muito quente ou muito frio. A sensação de (des)conforto é baseado numa rede de órgãos do sentido como olhos, ouvidos, nariz, sensores táteis, sensores de calor e cérebro. O padrão ASRAE (2004) define o conforto térmico como o estado da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico envolvente. A concepção do “ambiente térmico” engloba as trocas de calor atmosférico com o corpo (estresse) e a resposta fisiológica do corpo (esforço) (Jendritzky et al., 2012) que são influenciadas pelo conjunto de fatores atmosféricos como qualidade do ar, radiação, vento e efeito mecânico, odores, ruído e o *complexo térmico*. Segundo Andrade (2003, p. 3) o *complexo térmico* corresponde ao conjunto de variáveis atmosféricas (temperatura do ar, a temperatura radiativa, a humidade atmosférica e o vento) que, combinadas, condicionam a percepção e o conforto térmico humanos e os principais índices utilizados para avaliar essa influência. Além disso, o complexo térmico urbano condiciona o balanço energético do corpo humano que foi inicialmente proposto por Fanger (1972) e modificado por Höppe (1993) em:

$$M + W + Q^* + Q_H + Q_L + Q_{sw} + Q_{re} = 0 \quad (7)$$

(W/m²)

onde M é a taxa metabólica referente à produção interna de calor; W é a energia mecânica; Q^* o balanço de radiação (fluxo de calor radiativo); Q_H o fluxo turbulento de calor sensível (fluxo tipo convectivo) em que ocorre a troca de calor sensível entre a superfície do corpo humano e o ambiente imediato; Q_L o fluxo turbulento de calor latente devido à difusão do vapor de água através da pele; Q_{sw} o fluxo turbulento de calor latente relacionado com a evaporação do suor e Q_{Re} é o fluxo respiratório de calor sensível e latente. A unidade de medida dos termos desse balanço está em potência (W), em que o sinal positivo indica ganho de energia para o corpo e o sinal negativo perda de energia para o corpo (Höppe, 1999).

O corpo humano produz calor através do metabolismo, ao mesmo tempo que ele transfere o M para o ambiente externo a fim de manter um temperatura constante. A temperatura interna normal do corpo humano está próxima dos 37°C , sendo que o estresse térmico pode ocorrer quando os níveis estão abaixo ou acima desse limiar.

O equilíbrio termofisiológico entre o balanço do corpo humano e o ambiente imediato é influenciado pelos parâmetros meteorológicos e fatores humanos (Bradshaw, 2010). Os principais parâmetros meteorológicos que influenciam o conforto térmico e que foram objetos de análise deste estudo são a *temperatura do ar* que, por exemplo, afecta as taxas de Q_H e Q_{Re} ; a *temperatura radiativa média*, que é o resultado dos fluxos de radiação de ondas curtas e longas sobre o corpo humano, a qual influencia a Q^* ; a *umidade relativa do ar*, que afecta Q_{sw} , Q_{Re} e Q_L ; e a *velocidade do ar*, que afecta Q_H e Q_{sw} . Os fatores humanos (referência do indivíduo médio - idade, sexo, altura e massa corporal) referem-se ao nível da *atividade física* e ao *vestuário* (VDI, 1998; Höppe, 1999).

A combinação de parâmetros meteorológicos com fatores humanos é a base fundamental da aplicação de vários índices que tratam da avaliação do conforto térmico em espaço aberto. Atualmente, entre os índices destacam-se: Temperatura Efetiva Padrão (OUT_SET*) (De Dear e Pickup, 2000), Índice Térmico-Climático Universal (UTCI – *Universal Thermal Climate Index*) (Jendritzky et al., 2012), Voto Médio Estimado (MPV – *Predict Mean Vote*) (Fanger, 1972), e Temperatura Fisiológica Equivalente (PET- *Physiologically Equivalent Temperature*) (Höppe, 1999). Nesse contexto, foram propostos modelos para uma população específica, como é o caso do índice Temperatura Equivalente Percebida (TEP) por Monteiro (2008) que discute, inclusive, o desenvolvimento de vários índices e modelos bioclimáticos nas últimas décadas. Entre os índices citados, o PET foi o escolhido neste estudo para ser aplicado como a componente termofisiológica do bioclima de Aracaju, razões a seguir descritas.

1.1 Aplicabilidade do índice PET

O PET considera os processos termorregulatórios básicos⁹ e é baseado no modelo de balanço de calor termofisiológico chamado *Munich Energy Balance Model for Individuals* (MEMI). Höpfer (1999) definiu o PET como sendo

⁹ Segundo Andrade (2003, p.24) a “termorregulação é controlada pelo hipotálamo que funciona como um termostato, recebendo informações da temperatura interna enviada por termorreceptores profundos, no encéfalo, medula espinal, abdómen e outros locais, e da temperatura média da pele a partir de termorreceptores periféricos, localizados na pele”.

equivalente à temperatura do ar, que num ambiente típico ou cenário interno, o balanço de calor do corpo humano é mantido com as temperaturas do interior do corpo e da pele iguais às das condições avaliadas. O ambiente climático interno é definido quando a temperatura radiativa média é igual a temperatura, a velocidade do vento é igual 0.1ms^{-1} , e a pressão de vapor de água no ar é igual 12 hPa (o que equivale a umidade relativa de 50% e a uma temperatura de 20°C) (Höpper, 1999). Por outras palavras, o PET expressa a sensação térmica de um corpo humano, utilizando as temperaturas da pele e do interior do corpo como indicadores de referência.

Consagrado na literatura, o PET tem sido aplicado intensivamente nas regiões de climas frios, mediterrânicos, monções, subtropicais e tropicais. As características climáticas de Aracaju, já mencionadas ao longo desta investigação, tornam a utilização do índice PET justificável, em si, havendo ainda outras razões que merecem ser elucidadas:

- Além dos diferentes tipos de clima, o PET pode ser aplicado às estações do ano e as diferentes escalas espaciais (Matzarakis et al., 1999; Andrade, 2003);
- É calculado em unidade centígrados ($^{\circ}\text{C}$) que é bem conhecida pela comunidade científica e mais compreensível para os planejadores urbanos;
- O PET é um dos índices recomendados nas novas orientações climáticas alemãs – VDI guideline 3787, part 2 “*Methods for the human-biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning, part I: climate*” (VDI, 1998) –, que é uma referência internacional relativa à aplicabilidade do conhecimento climático no planeamento urbano;
- O PET tem sido aplicado na região do nordeste do Brasil, em especial para as cidades de clima semelhante ao de Aracaju (Katzschner et al., 1999; Moura et al., 2008; Andrade et al., 2002; Nery et al., 2008; Souza, 2010);
- O índice PET pode ser calculado por modelos numéricos, o que permite, entre tantas aplicações, distribuir seus valores espacialmente em mapas. O mapa bioclimático é uma ferramenta importante para as atividades de planeamento urbano (Matzarakis e Mayer, 1999), pois com os valores do PET espacialmente contínuos é possível identificar as áreas com os níveis de estresse térmico preocupantes (*hot spot thermal*). Inúmeros trabalhos têm produzido os mapas bioclimáticos para diferentes climas e morfologias urbanas, como na Grécia (Matzarakis et

al., 1999), Lisboa (Baltazar, 2014), Áustria (Matzarakis et al., 2010) e Stuttgart (Ketterer e Matzarakis, 2016).

Todavia, os limites do PET que definem qual o nível de estresse térmico e fisiológico duma pessoa é bem adaptada aos climas temperados (Matzarakis et al., 1999), sendo que novos ambientes têm sido adaptados (Tabela 11). Para exemplificar, a sensação confortável, sem estresse térmico, sentida por um europeu nórdico com valores de PET próximos de 20°C, pode não ser a mesma sensação térmica para um típico brasileiro nordestino. Aliás, a dimensão latitudinal do Brasil aponta para a necessidade de uma adaptação aos limites do PET, em consequência da existência de diferentes climas que correspondem a diferentes limiares de sensação térmica. Nesse sentido, um ajustamento aos limites de sensação térmica do PET tem sido proposto para a realidade brasileira. Os limites de valores do PET por Souza (2010) para a cidade de Salvador foram utilizados neste estudo, que serão descritos adiante na seção materiais e métodos.

Tabela 11: Diferentes limites de valores do PET na definição das condições de sensação térmica para os diferentes tipos de clima (adaptado de Katzschner et al., 1999).

| Sensação térmica (Grau de estresse térmico fisiológico) | Limites de valores do PET | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|--------------|
| | Europeu | Tropical | Brasil | São Paulo | Belo Horizonte | Salvador |
| | Katzschner et al. (1999) | Katzschner et al. (1999) | Katzschner et al. (1999) | Monteiro e Alucci (2007) | Hirashima (2014) | Souza (2010) |
| Muito frio (estresse frio forte) | <4°C | 4-8°C | <4°C | <4°C | -- | -- |
| Confortável (sem estresse térmico) | 18-23°C | ~ 24°C | 18-26°C | 18-26°C | 23-31°C | 26-29°C |
| Muito quente (estresse calor forte) | >41°C | >40°C | >43°C | >43°C | -- | >34°C |

1.2 Impacto da frente brisa marítima sobre o conforto térmico

A brisa marítima é comumente encarada como um elemento mitigador do estresse térmico nas áreas urbanas. Para alguns autores (por exemplo Emmanuel e Johansson, 2006) a ausência da brisa marítima durante as tardes mais quentes do ano contribui para um ambiente térmico desconfortável. Na cidade de Lisboa, Alcoforado et al. (2009) mostraram que as brisas do tipo estuarinas desempenham um papel importante na refrigeração do ar urbano

próximo da margem do rio Tejo. Na Grécia, Papanastasiou et al. (2010) evidenciaram que o desenvolvimento da brisa marítima esteve relacionado com uma redução significativa dos níveis de temperatura até 8,2°C durante as ondas de calor. No Funchal (Ilha da Madeira) Lopes et al. (2011) demonstraram que locais que receberam influência da brisa marítima apresentaram situações mais confortáveis, mesmo em condições de maior severidade térmica.

Não obstante a importância reconhecida da brisa marítima no conforto térmico humano, o capítulo 1 desta investigação fornece uma oportunidade inegável para avaliar essa relação numa nova perspectiva. Verificou-se na região do Estado de Sergipe que o desenvolvimento da brisa marítima, em forma de frente, está relacionado com um aumento médio da radiação solar e temperatura do ar, o que possivelmente agrava o desconforto térmico humano. Levando em conta que a frente de brisa representou mais de metade dos dias analisados no verão de 2015, este estudo explorou a sua relação com o conforto térmico em Aracaju.

2 Objetivos

Pretende-se avaliar as condições de conforto bioclimático em Aracaju através dos valores do índice PET. Para isso, este estudo tem os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar as condições de conforto térmico nos climas locais apresentados no capítulo 3, por meio da variação diária da temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e a velocidade do vento.
- Analisar a variação diária sazonal do PET;
- Apresentar as frequências relativas diurna e noturna do PET;
- Explorar a relação entre a frente de brisa e o conforto térmico no verão 2015;
- Elaborar um mapa bioclimático de Aracaju.

Como resultado desses objetivos, várias hipóteses podem ser apresentadas:

- Os climas locais apresentam diferentes condições de conforto térmico em Aracaju?
- O desenvolvimento da frente de brisa tem efeito positivo ou negativo no conforto térmico em Aracaju?

3 Materiais e métodos

A caracterização do conforto bioclimático de Aracaju partiu da análise da correlação das variáveis meteorológicas com a componente termofisiológica do clima obtidos através da observação meteorológica e da modelagem numérica.

3.1 Dados usados e cálculo do PET

Dados horários de temperatura do ar (°C) e umidade relativa (-%) de sete estações urbanas da Rede Climatológica Urbana (RCU) e os dados relativos à radiação solar (KJ m⁻²), velocidade do vento (ms⁻¹) e nebulosidade (oitavos) foram obtidos através das estações meteorológicas automáticas do INMET e Aeroporto (ver no capítulo 2 a localização das estações).

O índice PET foi usado para avaliar a componente termofisiológica humana, considerando as estações urbanas da RCU as condições de conforto térmico em Aracaju. Os valores do PET foram estimados com uso do software RayMan® desenvolvido por A. Matzarakis, F. Rutz, e H. Mayer, do Instituto Meteorológico da Universität Freiburg (Matzarakis et al., 2007, 2010, 2016). Esse software está disponível gratuitamente no site da internet (<http://www.mif.uni-freiburg.de/rayman/intro.htm>).

O cálculo do PET tem em conta a combinação dos parâmetros meteorológicos com os fatores humanos. Em relação ao primeiro aspecto, Mayer e Matzarakis (1998) e Matzarakis et al. (1999) alertaram que o problema no cálculo do PET em obter dados meteorológicos medidos a uma altura significativa para a biometeorologia humana (1.1 m acima do solo, que representa a altura média de um indivíduo em pé na Europa), e de preferência com resolução espacial e temporal ótimas. As medições das estações urbanas da RCU são efetuadas a uma altura de 3.5 m acima do solo e as das estações meteorológicas do INMET e Aeroporto seguem os ditames da Organização Meteorológica Mundial com 2 metros acima do solo, exceto a velocidade do vento que é medida a 10 metros acima do solo, havendo, portanto, a necessidade de ajustes na série dos dados. Neste estudo, contudo, apenas os dados relativos à velocidade do vento foram ajustados e, portanto, os resultados aqui alcançados estão limitados a uma verificação *a posteriori* em relação ao ajuste das outras variáveis. Assim, foi recalculada a série da velocidade do vento (v) da altura padrão de 10 m acima do solo para a altura referência da biometeorologia humana de 1.1 metros acima do solo, seguindo a fórmula (Kutter, 1998 citado por Gulyás et al., 2006):

$$v_{1.1} = v_h (1.1/h)^{\alpha}, \alpha = 0.12z_0 + 0.18 \quad (8)$$

onde v_h é a velocidade do vento (ms^{-1}) a uma altura h (10m), α é um expoente empírico que depende da rugosidade da superfície, e z_0 é a rugosidade aerodinâmica da superfície. Como as localizações das estações INMET e Aeroporto apresentam densidade urbanas diferentes, optou-se por recalculá-las cada série de v separadamente. Como resultado da equação 2, obteve-se α de 0.204 para as elevadas densidades urbanas representado pela estação INMET e α de 0.181 as baixas densidades urbanas representadas pela estação Aeroporto Santa Maria. Desse modo, a série v da INMET recalculada para 1.1 metros acima do solo foi usada no cálculo do PET das estações urbanas da área central (Siqueira Campos, Centro da Cidade, Jardins) e do Norte da cidade (Parque da Cidade), ao passo que a série v foi recalculada do Aeroporto para as estações da área periurbana (Santa Maria, Praia José Sarney e Zona de Expansão). Quanto aos fatores humanos, aplicaram-se os requisitos padrão do modelo RayMan à uma pessoa sujeita a um ambiente térmico, a saber: homem, 35 anos e 75kg, altura de 1.75 metros em pé e parado, levemente vestido (com isolamento de roupas de 0,5 clo) e atividade física sedentária (atividade de 80W).

Neste estudo considerou-se a temperatura radiativa média ($^{\circ}\text{C}$) que é um dos parâmetros climáticos que mais influencia o PET nos dias de verão (Mayer e Matzarakis, 1998). A temperatura radiativa média é definida como a temperatura que permite expressar a influência combinada de todos os fluxos radiativos do ambiente, através de um único valor de temperatura (Andrade, 2003, Ashrer, 2005).

3.2 Análise dos dados

A análise deste estudo decorreu da distribuição diária sazonal (*estação quente* e *estação fresca* (capítulo 3)) das variáveis meteorológicas temperatura, umidade relativa, radiação solar, v , temperatura radiativa média e valores do PET, incluindo as frequências relativas no período 2014-2016. A escala de sensação térmica proposta por Souza (2010) foi usada neste estudo uma vez que foi aplicada para a população da cidade de Salvador/BA que apresenta condições climáticas semelhantes às de Aracaju (Tabela 12). A relação entre a frente de brisa marítima e o conforto térmico foi levada mediante a comparação dos valores médios horários do PET das sete estações urbanas nos dias com FBM e nos dias sem FBM referente ao verão 2015 (capítulo 1).

Tabela 12: Classes do PET, diferentes níveis de sensação térmica e respectivo estresse fisiológico nos seres humanos usados neste estudo (adaptado de Souza, 2010).

| PET | Sensação térmica | Nível de estresse fisiológico |
|-------------|------------------|-------------------------------------|
| <18°C | Frio | Estresse frio acentuado |
| 18°C a 26°C | Fresco | Estresse frio de ligeiro a moderado |
| 26°C a 29°C | Confortável | Sem estresse térmico |
| 29°C a 34°C | Quente | Estresse calor moderado |
| >34°C | Muito quente | Estresse calor acentuado |

3.3 Modelação do PET à escala mesoclimática

A análise do conforto térmico foi complementada pela distribuição espacial dos valores do PET através de um mapa bioclimático. Para isso, um modelo estatístico assente na técnica de regressão linear múltipla (Ketterer e Matzarakis, 2016) foi aplicado para se obter uma relação numérica entre os valores do PET e os parâmetros morfológicos numa determinada área ou grade específica. A partir do nível de significância, o modelo ajuda a compreender quais as variáveis que têm maior influência no conforto térmico, e assim predizê-lo com base na variação de um conjunto de variáveis explicativas.

Para determinar a variável dependente (y) no modelo estatístico, optou-se por selecionar – dentro da série de valores do PET analisada neste estudo (entre 2014 a 2016) –, um período que caracterizasse uma situação típica de estresse térmico acentuado para a população. Desse modo, a média do PET entre as 12:00h e as 19:00h no verão 2015 foi determinada para ser o valor da variável dependente, posto que coincide com as passagens da frente de brisa que, como foi visto no capítulo 1, as condições de estresse térmico são agravadas. Em relação aos parâmetros morfológicos, as variáveis explicativas (independentes) selecionadas foram: distância em relação ao mar (X_1), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (X_2), rugosidade aerodinâmica (X_3) e fator de visão do céu (X_4). A variável X_1 representa influência marítima sobre o conforto térmico, criada através da função *distância euclidiana* embutida no software ArcGIS®. A variável X_2 indica a presença e a densidade do coberto vegetal, criada com base na imagem do satélite Landsat-8/ETM+ de 5 fevereiro de 2015 e através da fórmula que combina as bandas, $NDVI = (infravermelho\ próximo - vermelho) / (infravermelho\ próximo + vermelho)$. A variável (X_3) representa as trocas de massa de ar e seu papel na redistribuição do calor na cidade. A variável (X_4) indica a densidade urbana e a influência da geometria urbana nas trocas de calor. Os procedimentos metodológicos das variáveis X_3 e

X_4 serão abordados no capítulo 6, por se tratar de variáveis que compõem as Unidades de Resposta Climática Homogênea.

Assim, o modelo de regressão múltipla aplicado à espacialização do PET resultou na seguinte fórmula:

$$\gamma = 37,46 + (0,00012 * X_1) + (2,25915 * X_2) + (-0,25344 * X_3) + (-9,12848 * X_4) \quad (9)$$

O resultado desse modelo de regressão foi aplicado numa grelha 100m x 100m, onde o valor médio de cada variável explicativa foi calculado, gerando-se o valor correspondente ao PET para cada célula da grade. O método de interpolação “Krigagem Originário”, que foi já usado noutras ocasiões em Aracaju (Anjos, 2012a; Anjos et al., 2013), serviu para gerar o mapa bioclimático com a espacialização dos valores contínuos do PET referente à situação típica de estresse térmico acentuado.

4 Resultados

4.1 Variação horária da velocidade do vento e radiação solar

A média diária sazonal da velocidade do vento (v), radiação solar no período 2014-2016 são apresentadas na Figura 30 (a)(b). Com relação ao curso diurno de v recalculado para 1.1 metros acima do solo, foi verificada uma redução média de 2 ms^{-1} em relação a v medida a 10 metros acima do solo. Na *estação quente* v da estação Aeroporto foi mais expressiva com o máximo até 4.2 ms^{-1} a ocorrer às 16:00h e mínimo de 2.2 ms^{-1} às 09:00h, comparados com a v da INMET com o máximo 2.7 ms^{-1} e mínimo 1.4 ms^{-1} ocorrendo nas mesmas horas (Figura 30 (a)). Na *estação fresca*, verificou-se uma redução nos valores médios da v nas duas estações meteorológicas comparados com a *estação quente* (Figura 30 (b)). Quanto à radiação solar, foram observados os maiores valores na *estação quente* com o pico médio de 2.600 KJ m^{-2} às 16:00h comparados com 2.200 KJ m^{-2} na *estação fresca*.

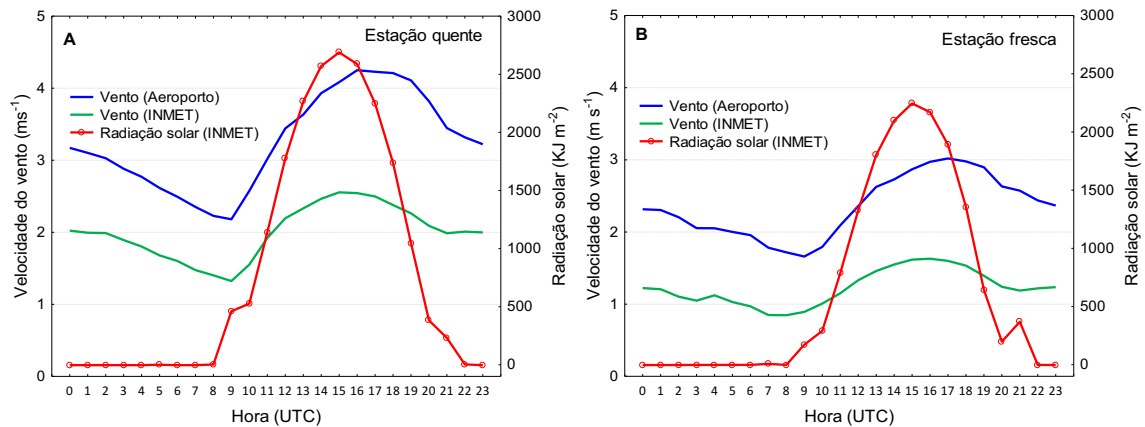


Figura 30: Média horária sazonal das velocidades do vento para as estações do Aeroporto e INMET recalculadas para 1.1 metros acima do solo e da radiação solar medida a 2 metros, no período 2014-2016.

4.2 Variação diária sazonal da temperatura radiativa média e do PET

Seguindo quase na mesma proporção que o da temperatura, o curso diário da temperatura radiativa média apresentou um rápido aumento nos valores médios iniciado às 05:00h atingindo os máximos entre as 10:00h e as 16:00h, e declinando bruscamente a partir das 17:00h. A *estação quente* foi caracterizada por valores mais elevados de temperatura radiativa média na ordem dos 53°C nas estações urbanas Siqueira Campos, Centro da Cidade e Jardins, indicando a influência da forte radiação solar no estresse térmico (Figura 31 (a)). Tal comportamento de temperatura radiativa média pode ser também observado na *estação fresca*, embora com valores um pouco abaixo em relação a *estação quente* (Figura 31 (b)).

No que diz respeito à variação diária do PET, há dois períodos bem marcados que praticamente se igualam sazonalmente (Figura 32). O primeiro é o noturno (22:00h – 07:00h) caracterizado pela predominância única da classe *fresco* (PET entre 18°C a 29°C) em todas as estações urbanas. O segundo turno é o diurno (0800h - 2100h) caracterizado pelas classes “*confortável*” (26°C a 29°C), “*quente*” (29°C a 34°C) e “*muito quente*” (a partir 34°C). Na *estação quente*, todas as estações urbanas registraram a classe *confortável* em dois momentos curtos do dia: um 07:00-09:00h e outro 16:00-17:00h; seguida pela classe “*quente*” entre as 08:00-17:00h, período quando Jardins, Siqueira Campos, Centro da Cidade e Parque da Cidade registraram os valores do PET na classe “*muito quente*” (Figura 32 (a)). Na *estação fresca*, Santa Maria, Zona de Expansão e Praia José Sarney permaneceram durante todo o período diurno as classes *fresco* e *confortável*, enquanto Jardins, Siqueira Campos e Centro da Cidade prevaleceram as classes “*quente*” e “*muito quente*”, exceto Parque da Cidade que, ao contrário da *estação quente*, permaneceu até a classe “*quente*” (Figura 32 (b)).

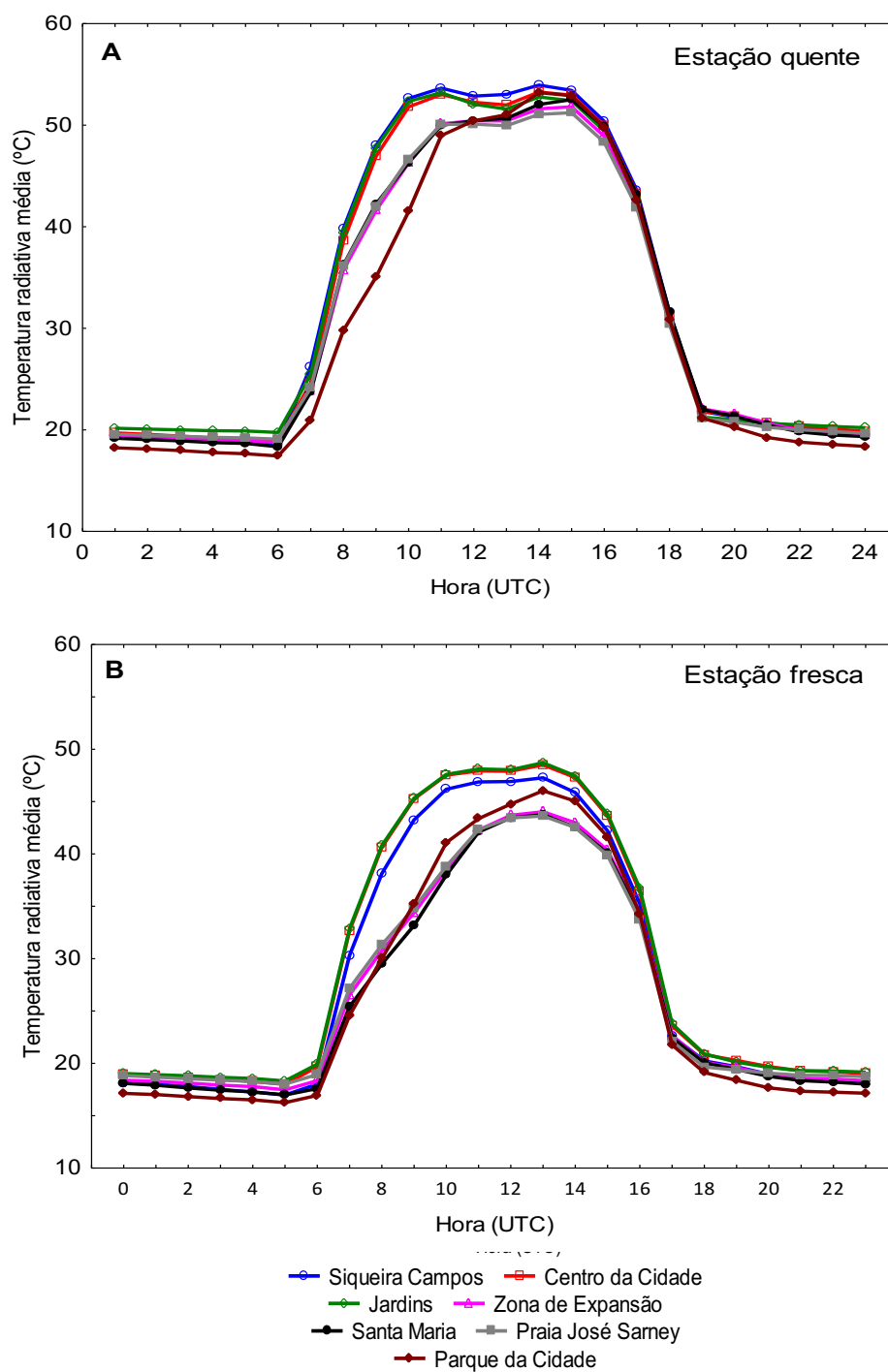


Figura 31: Médias horárias sazonais da temperatura radiativa média estimada a 3.5 metros acima do solo referentes às estações urbanas da RCU, no período de 2014-2016.

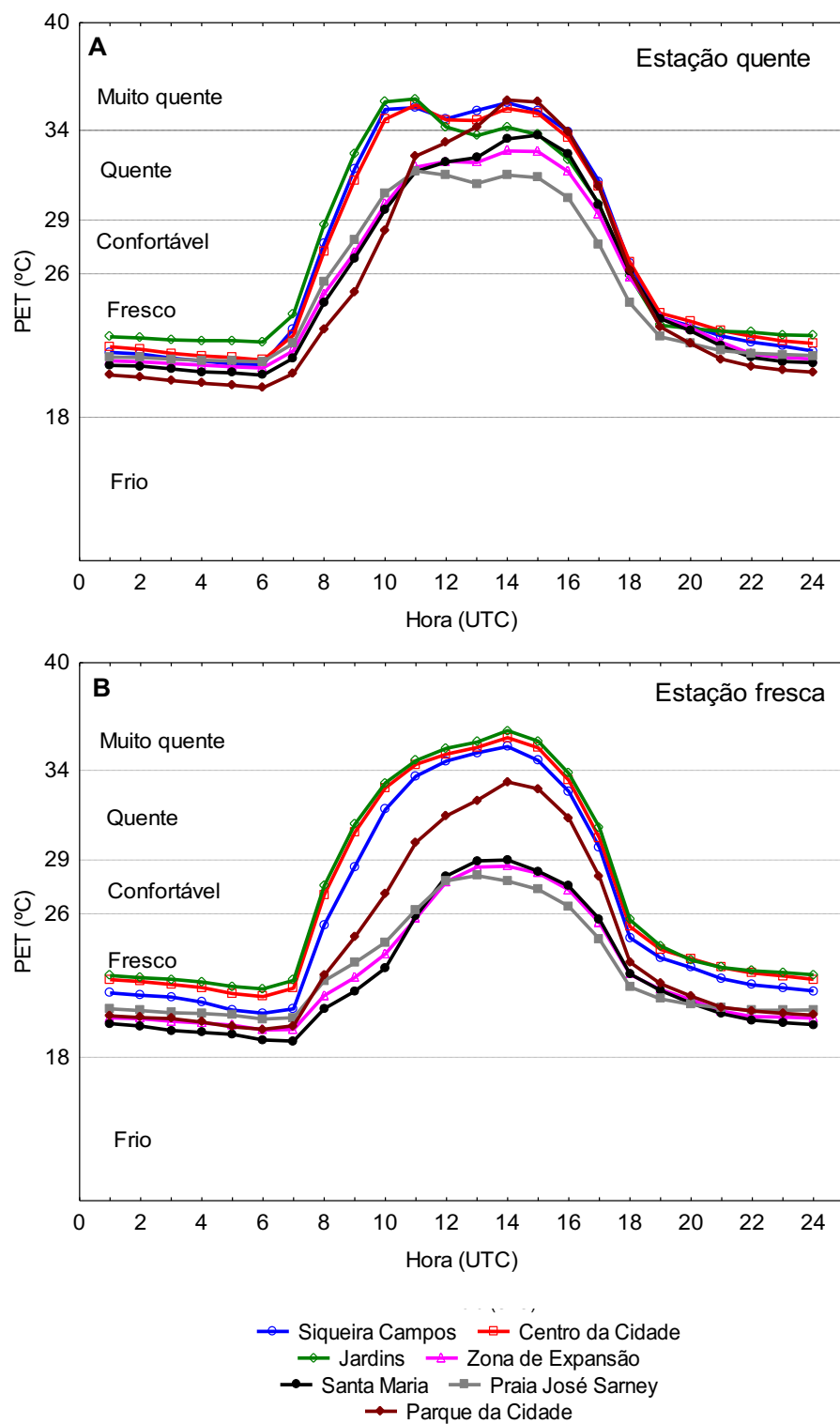


Figura 32: Médias horárias sazonais dos valores do PET de sete estações urbanas estimados a 3.5 metros acima do solo no período 2014-2016.

4.3 Frequências relativas diárias do PET

Os resultados da Figura 33 mostram que em Aracaju predomina a classe *fresco* com frequências superiores a 80% durante o turno noturno e próximos de 40% durante o período diurno em praticamente todas as estações urbanas. Nesse período, destacam-se a classe *quente* que registrou acima dos 20% em todas as estações urbanas, seguida pela classe *muito quente*, exceto para Santa Maria, Zona de Expansão e Praia José Sarney que registraram 5% das ocorrências.

A classe *confortável* permeceu estável com frequência abaixo dos 10% no turno diurno e valores próximos do nulo no noturno entre as estações analisadas, exceto nas áreas centrais, em especial Siqueria Campos e Jadins onde foram registados 20% e 10%, respectivamente. Quanto à classe *frio*, Santa Maria, Zona de Expansão, Praia José Sarney e Parque da Cidade foram as únicas a registrar a classe frio com frequências até 10%. Em particular Parque da Cidade, deve-se notar que embora a classe *fresco* tenha tido a maior ocorrência (40%), as classes *quente* e *muito quente* registram as frequências significativas de 30%, igualando-se às estações urbanas das áreas centrais (Figura 33).

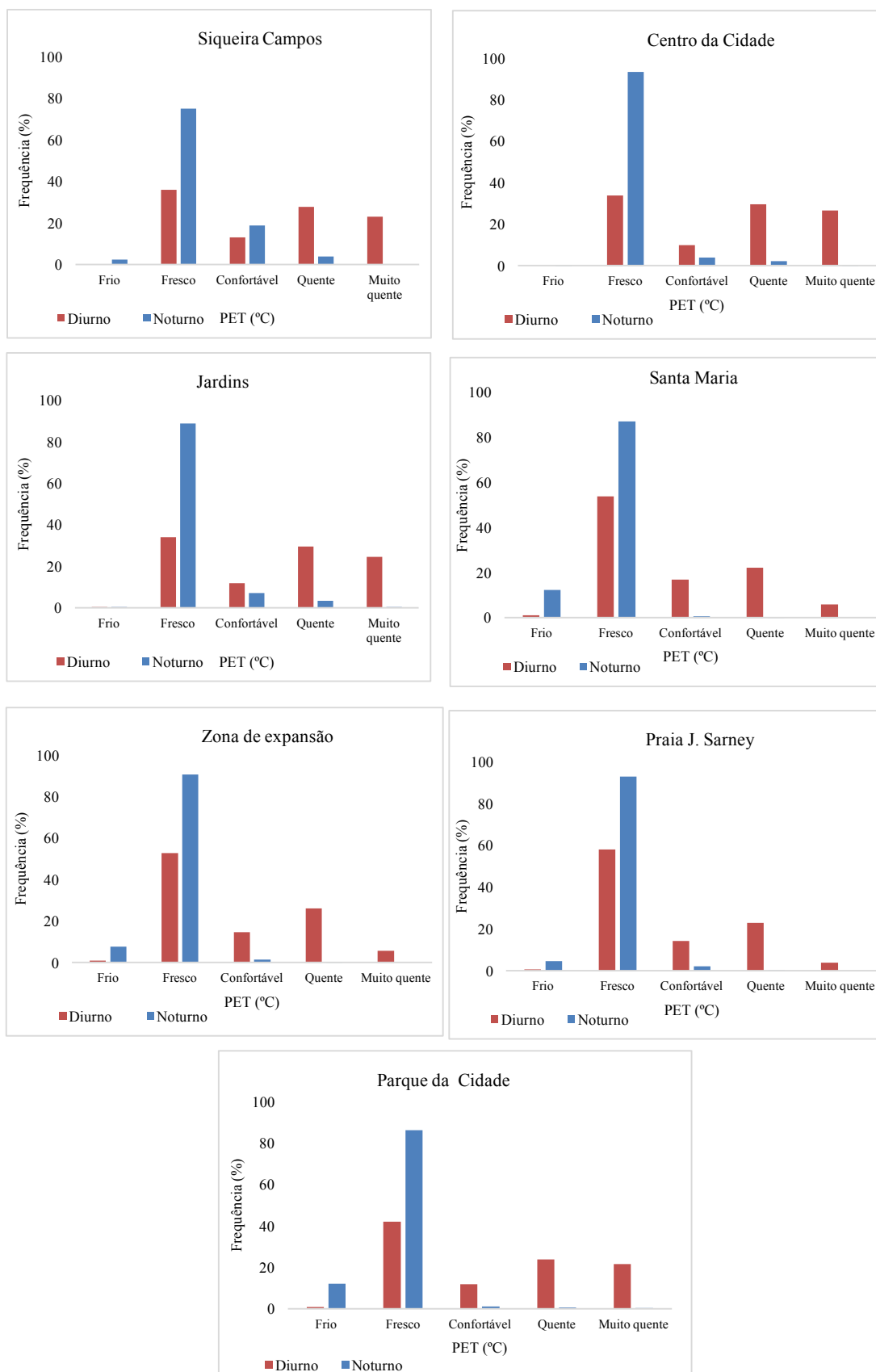


Figura 33: Frequência diurna (10:00- 20:00h) e noturna (22:00-07:00h) das classes do PET de sete estações urbanas no período 2014-2016.

4.4 Variação diária do PET em eventos de frente de brisa (FBM)

Os valores médios horários do PET das estações urbanas foram comparados nos *dias com FBM* e nos *dias sem FBM* referentes ao verão 2015. A Figura 34 mostrou um ligeiro aumento médio de 1°C do PET durante os *dias com FBM* a partir das 10:00h em todas as estações urbanas, destacando-se Parque da Cidade com o valor máximo de 2°C às 15:00h. A tabela 13 mostra que, estatisticamente, houve também um aumento nos valores mínimos do PET (próximos de 1°C) em todas estações urbanas durante os *dias com FBM*, enquanto o aumento nos máximos do PET esteve relacionado com os *dias sem FBM*.

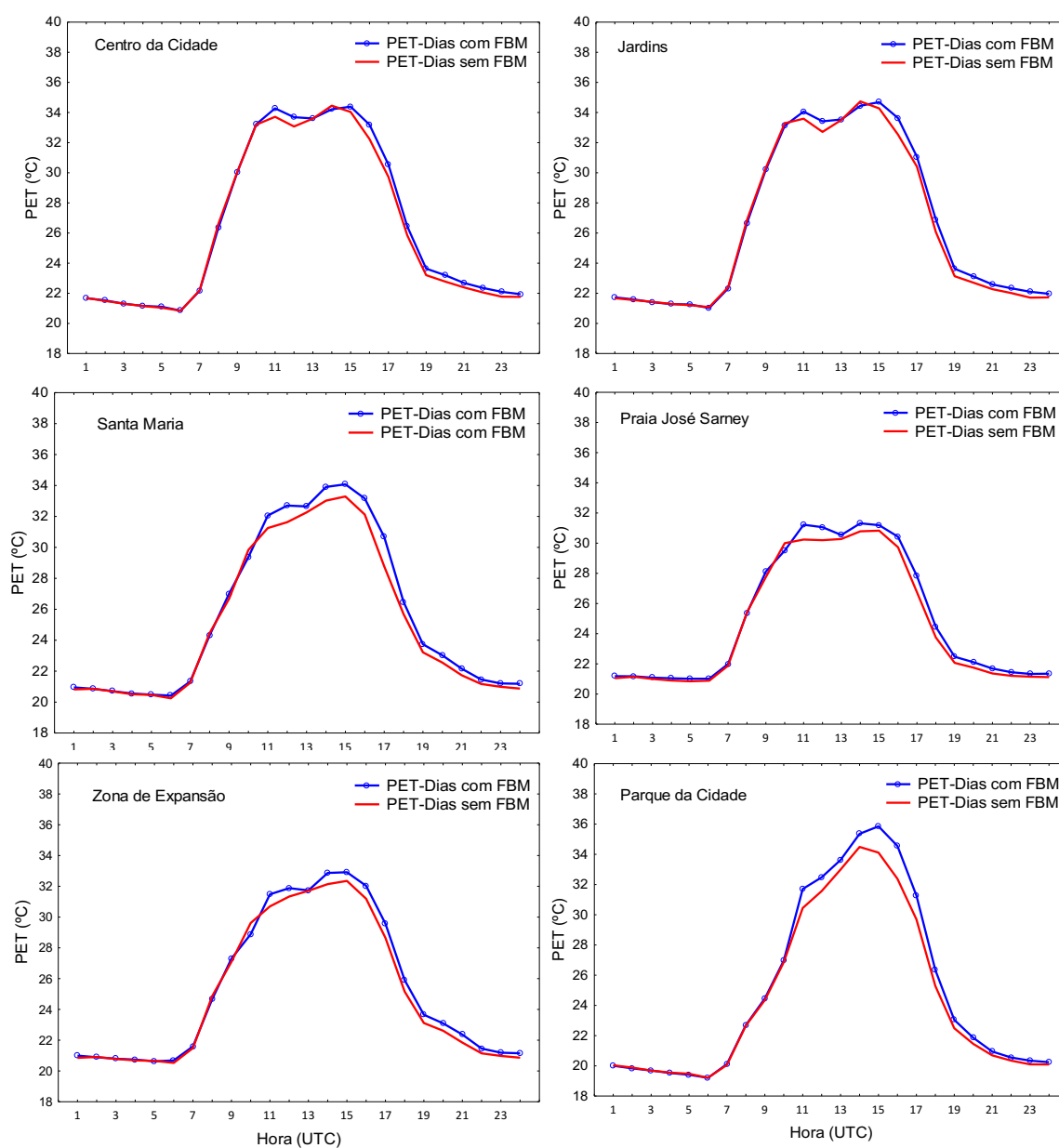


Figura 34: Comparação das médias horárias do PET das estações urbanas nos dias com FBM e nos dias sem FBM no verão 2015.

Tabela 13: Estatística básica dos valores do PET nos dias com FBM e nos dias sem FBM no verão 2015.

| Estação urbana | PET (°C) | | | | | | | |
|-------------------|--------------|------|------|--------------|--------------|------|------|--------------|
| | Dias com FBM | | | | Dias sem FBM | | | |
| | Média | Min | Max | Desv. padrão | Média | Min | Max | Desv. padrão |
| Centro da Cidade | 30 | 21 | 43 | 5.011 | 29.5 | 20 | 44 | 5.194 |
| Jardins | 30 | 21 | 43 | 5.078 | 29.5 | 19 | 44 | 5.273 |
| Zona de Expansão | 29 | 20.5 | 46.5 | 4.523 | 28.5 | 18.5 | 49 | 4.713 |
| Santa Maria | 29.5 | 21 | 48 | 4.959 | 28.5 | 19 | 50 | 4.993 |
| Praia José Sarney | 27.5 | 20 | 48.5 | 4.467 | 27 | 19.5 | 48.5 | 4.507 |
| Parque da Cidade | 29.5 | 19.5 | 42.5 | 5.778 | 28.5 | 18.5 | 43 | 5.722 |

4.5 Modelação espacial dos valores do PET

O mapa bioclimático de Aracaju com a espacialização dos valores contínuos do PET é apresentado na Figura 35. O mapa foi elaborado através da técnica de regressão múltipla, cujo coeficiente de determinação (r^2 0.95 - equação 3) mostrou uma forte correlação entre a variável dependente e as variáveis independentes, indicando que 90% da variabilidade do PET pode ser explicada pelo modelo estatístico. A validação desse modelo decorreu de 7 observações e 5 variáveis explicativas resultando numa probabilidade de 95%, na qual se obteve o valor de Fisher (4.7) superior ao valor limiar.

O mapa da Figura 35 mostra uma distinção clara dos valores do PET relativos a uma situação típica de forte estresse térmico no verão 2015, em que os bairros de densidades urbanas relativamente elevadas na área central da cidade apresentaram valores de PET entre 30°C a 32°C. Por outro lado, os bairros da parte sul da cidade caracterizados por baixas densidades urbanas apresentaram valores de PET a partir dos 28°C. Os valores máximos de PET até 37.5 podem ser encontrados nos bairros Jardins, Treze de Julho, Salgado Filho, Centro e Siqueira Campos.

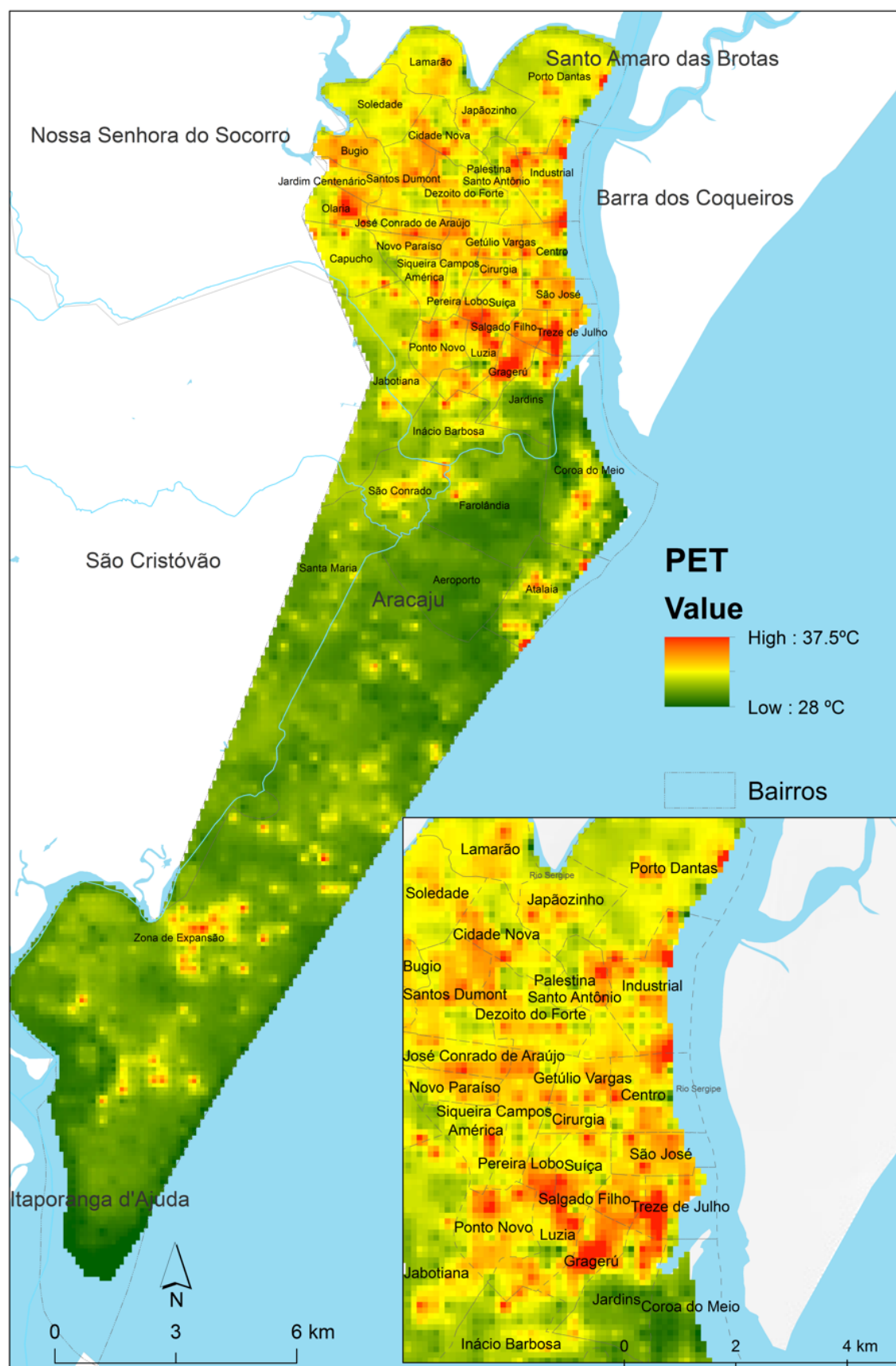


Figura 35: Mapa bioclimático de Aracaju para situação típica de forte estresse térmico relacionada com a passagem da frente de brisa no verão 2015.

5 Discussão

De fato, os climas locais existentes têm diferentes condições de conforto térmico em Aracaju. Daí a importância de serem monitorados permanentemente. Este estudo ajudou a definir melhor os quatro climas locais apresentados no capítulo 3, de modo que é possível compreender as diferenças de sensação de conforto térmico experimentadas em cada um deles. O primeiro clima local pode ser encontrado na área central da cidade (estações urbanas Jardins, Centro da Cidade e Siqueira Campos) onde foram registradas as classes “*quente*” e “*muito quente*” (valores médios horários do PET entre 29°C a 35°C) na maior parte do dia, indicando níveis de estresse térmico de *moderado* a *acentuado*. A classe *confortável* não ultrapassou 20% das frequências no turno diurno e 5% no noturno. Esses espaços urbanos são caracterizados pela alta taxa de edificação, cobertura asfáltica e pouca ou nenhuma presença de vegetação. A exposição diferenciada das estações urbanas relativamente aos ventos predominantes na região também pode ajudar a compreender como a rugosidade aerodinâmica compromete a circulação do ar e, consequentemente, o transporte de calor próximo à superfície. O segundo clima local encontra-se na área periurbana da cidade (Santa Maria e Zona de Expansão) onde predominou a classe “*quente*” durante as tardes quentes e a classe “*confortável*” durante as tardes frescas. As razões para essa redução no nível de estresse térmico na *estação fresca* derivam da redução média da radiação solar nesta época do ano. Todavia, nem sempre as condições de ventilação e baixas densidades de construção são suficientes para mitigar o estresse térmico, uma vez que foram verificadas nas áreas periurbanas as frequências relativas até 30% da classe “*quente*” durante o período de maior aquecimento diurno. Esse resultado revela que, embora o vento seja um importante elemento mitigador do estresse térmico, há casos que ele não compensa o aumento da temperatura e a temperatura radiativa média devido à forte insolação diária. O terceiro é o clima local mais influenciado pela frente marítima (Praia José Sarney) em que registrou as sensações térmicas mais amenas ao longo do ano, onde as classes “*fresco*” e “*confortável*” dominam a maior parte do tempo, fazendo jus à sua localização à beira mar. Todavia, mesmo sendo beneficiado pela ventilação, esse clima local apresentou durante as tardes quentes 25% das ocorrências as condições térmicas desconfortáveis atribuídas à forte exposição à radiação solar.

O quarto e último clima local encontra-se sobre o espaço verde no norte da cidade (Parque da Cidade). Ali, em muitos casos, verificou-se que o espaço verde esteve mais aquecido do que a sua área construída envolvente, uma vez que ficou demonstrada a existência de situações de desconforto térmico segundo os níveis de estresse térmico *moderado* e *acentuado*. Seja durante as tardes

quentes ou tardes frescas, a sensação térmica no espaço verde mostrou-se crítica com a presença das classes “*quente*” e “*muito quente*”, ocorrendo mais que 20% dos casos. Isso é particularmente importante, já que se esperava nesse momento do dia que o espaço verde tenha uma resposta climática positiva no melhoramento do conforto térmico. Essa situação adversa pode estar relacionada com as características físicas do espaço verde principalmente devido aos espaços abertos dentro do parque mais expostos à intensa insolação associada à redução da velocidade do vento pela densidade arbórea ao nível do espaço verde, que influenciaram o aumento da temperatura média do Parque da Cidade no período da tarde, como mostrou a Figura 20 (a). Por outras palavras, isso sugere que, se os espaços verdes não forem bem geridos, situações de desconforto térmico podem ser frequentes, o que pode comprometer as atividades dos ocupantes e contribuir para a diminuição de utilidade desses espaços urbanos.

Em linhas gerais, as condições de estresse térmico em Aracaju mostradas pelos valores de PET podem ser preocupantes para a saúde da população. Os resultados revelam que essa preocupação é evidentemente maior durante o turno diurno, dada a significância térmica das classes “*quente*” e “*muito quente*”. A almejada classe “*confortável*” ocorreu apenas em dois momentos curtos do dia com duração de 1 hora, conforme é ilustrado na Figura 31. Em contrapartida, prevaleceu durante o turno noturno a classe “*fresco*” (estresse térmico *frio ligeiro a moderado*). Esse fato, coaduna-se com a ideia de Hwang et al. (2009) que os ocupantes dos espaços abertos nos trópicos preferem a sensação térmica no intervalo entre a neutralidade e o levemente fresco, ao invés tão-somente da classe “*confortável*”. Além disso, os níveis de estresse térmicos observados nas noites em Aracaju podem ser interpretados pelo que Emmanuel (2016) denomina de prazer térmico (*thermal pleasure*).

Este estudo também apresentou fortes evidências sobre o fato que o desenvolvimento da frente de brisa marítima está relacionado com o aumento do desconforto térmico em Aracaju. Ao comparar na Figura 34 a variação diária dos valores do PET de seis estações urbanas nos *dias com FBM* e nos *dias sem FBM*, ficou claro um aumento médio dos valores de PET até 2°C durante os *dias com FBM*, confirmando a hipótese inicial que o desenvolvimento da frente de brisa tem efeito negativo no conforto térmico em Aracaju. O resultado deste estudo torna mais complexa a ideia comum que as populações que vivem próximo à costa sentem-se ligeiramente mais confortáveis durante o dia quando são influenciadas pela brisa marítima (Emmanuel e Johansson, 2006; Lopes et al., 2011; Papanastasiou et al., 2010). Cidades com dimensões maiores e uma morfologia urbana mais complexa que

Aracaju poderiam beneficiar desse achado para avaliar as suas condições de conforto térmico humano.

As diferenças espaciais nos níveis de estresse térmico na cidade foram evidenciadas no mapa bioclimático, notavelmente entre as áreas centrais com valores de PET até 37.5°C que significam estresses térmicos do *moderado* ao *acentuado* e as áreas periurbanas com valores de PET entre 28°C a 30°C do *moderado* ao *sem estresse térmico*. Essa diferença espacial nos níveis de estresse térmico está atribuída aos diferentes usos do solo, posto que comparados com as áreas periurbanas da cidade, nas áreas centrais são caracterizados pelas elevadas taxas de permeabilização, maior coeficiente volumétrico, menor FVC, maior rugosidade aerodinâmica, que contribuem para um maior armazenamento da energia pelos edifícios e retenção da radiação (calor) por múltiplas reflexões, ao nível das ruas (*canynos* urbanos). Deve-se notar, todavia, que muitas áreas da cidade sofrem com o estresse térmico *moderado* ou *acentuado* quando se trata de espaços abertos submetidos a uma prolongada exposição à forte radiação solar. Mas, obviamente, algumas áreas têm uma vantagem aparente na redução dos níveis de estresse térmico em relação às outras áreas, onde sobretudo há uma boa exposição aos ventos dominantes úmidos que facilita o transporte de calor (Arens et al., 2009) e a presença significativa de vegetação que protege dos raios solares e promove a sombra. Vários estudos (por exemplo Souza, 2010) indicam para um contexto climático semelhante ao de Aracaju que a sombra e o vento são os fatores que mais influenciam o conforto térmico, associação considerada por alguns autores (Emmanuel et al., 2007; Lin et al., 2010; Shashua-Bar et al., 2011; Abreu et al., 2012) como uma estratégia fundamental no processo de planejamento de cidades tropicais frente ao estresse térmico.

5.1 Limitações

Apesar do primeiro avanço dado na avaliação do bioclima de Aracaju, deve-se considerar o carácter preliminar deste estudo, em que algumas limitações podem ser elencadas:

- I. A avaliação do conforto térmico levada a cabo partiu da escala local. A representatividade microescalar nesse tipo de estudo é fundamental, pois permite averiguar, de forma mais consistente, a influência da geometria do espaço urbano que é particular nos níveis de estresse térmico. Experimentos de campo sistemáticos através de medições dos parâmetros meteorológicos, acompanhados de entrevista com questionário específico aplicado à uma população específica são necessários para compreender melhor as condições de conforto térmico dentro da cidade;

- II. A avaliação centrou-se no conforto térmico em espaço aberto que tanto serve de ligação para a avaliação no ambiente interno (*indoor*) (Höppe, 2002; Nicol e Humphreys, 2002), pois como salientou Emmanuel (2016, p. 40): “*A critical lacuna in universal thermal comfort norms is the lack of specification of the outdoors. This is especially important in the tropics where the design norm is naturally ventilated buildings*”.
- III. Embora, as condições de conforto térmico durante os períodos diurno e nocturno foram inicialmente estudadas, tais condições podem alterar significativamente ao longo do dia. Fanger et al. (1974, p.16) argumentaram: “*The fact that the internal body temperature varies over 24 hours is well known and it is therefore conceivable that man's preferred ambient temperature may also vary during the day*”. O ajuste dos parâmetros meteorológicos do ambiente de acordo com as preferências das pessoas pode ser investigado mais a fundo com base na primeira limitação levantada;
- IV. A evidência do efeito urbano nos níveis de estresse térmico foi representada pelo mapa bioclimático. A espacialização dos valores de PET sobre as diferentes estruturas da cidade levanta uma questão de desejável análise: a vulnerabilidade ao calor extremo. Futuros estudos serão fundamentais a fim de adquirir uma compreensão mais completa do impacto do calor na saúde da população. Uma análise agregada das características demográficas com análises quantitativas e qualitativas da capacidade de adaptação social e econômica (Wilhelmi e Hayden, 2010) pode fornecer elementos sobre os riscos relacionados ao calor extremo.

6 Conclusão

O principal objetivo desse trabalho foi fazer uma avaliação do bioclima de Aracaju através dos valores do PET que é um indicador importante no conforto e na habitabilidade urbana. A existência de climas locais bem definidos foi determinante na diferença das condições de conforto térmico dentro da cidade. Além disso, foram constatados níveis de estresse térmico aparentemente preocupantes para a população no período diurno e níveis de estresse “prazerosos” no período noturno. Os resultados revelaram também, de forma contundente, a contribuição negativa do desenvolvimento da frente de brisa no conforto térmico em Aracaju.

Capítulo 5: Avaliação da qualidade do ar

1 Introdução

O grau de poluição do ar é um dos indicadores mais importantes na habitabilidade das cidades. A necessidade de respirar ar “puro” tem levado cidades em todo o mundo a reunir informações sobre a poluição atmosférica a fim de proteger a saúde pública dos seus incontestáveis efeitos prejudiciais na saúde humana (Saldiva et al., 1994; WHO, 2003; Chow et al., 2006; Olmo et al., 2011). Em muitas cidades do mundo, inclusive as brasileiras, as emissões de poluentes a partir das fontes de automóveis constituem um dos mais importantes mecanismos de poluição do ar (WHO, 1993; Fenger, 1999; Lawrence et al., 2006; Gurjar et al., 2008; Andrade et al., 2012; Miranda et al., 2012).

1.1 Norma legislativa da qualidade do ar nas cidades brasileiras

Atualmente, o padrão de qualidade do ar das cidades brasileiras é avaliado com base na legislação nacional em vigor, a Portaria Normativa nº14/1990 do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e que está submetida ao Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Na resolução nº3/1990 do CONAMA estão fixados os padrões de qualidade do ar considerando os poluentes atmosféricos primários¹⁰, o tempo de amostragem e o método de medição (Tabela 14).

Em 1989, o CONAMA criou o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR) com o objetivo de

“permitir o desenvolvimento econômico e social do país de forma ambientalmente segura, pela limitação dos níveis de emissão de poluentes por fontes de poluição atmosférica, com vistas à melhora da qualidade do ar, ao atendimento dos padrões estabelecidos e o não comprometimento da qualidade do ar nas áreas consideradas não degradadas” (PRONAR, 1989, p.1).

¹⁰ São os poluentes atmosféricos primários que são gerados diretamente pelas fontes de emissão (monóxido de carbono), enquanto os poluentes atmosféricos secundários (ozônio) resultam de reações dos poluentes primários com substâncias presentes na camada baixa da atmosfera.

Tabela 14: Padrões nacionais de qualidade do ar adotados pelas cidades brasileiras, segundo o CONAMA nº3/1990.

| Poluente | Tempo de amostragem | Padrão primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Método de medição |
|--|--|--|---|
| Particulados Totais em Suspensão (PTS) | 24 horas** (MGA-Média geométrica anual) | 240 80 | Amostra de grandes volumes ou equivalente |
| Dióxido de Enxofre | 24 horas MAA (Média aritmética anual) | 365 80 | Pararosanilina ou equivalente |
| Fumaça | 24 horas MAA | 150 60 | Equivalente |
| Partículas inaláveis (MP ₁₀) | 24 horas MAA | 150 50 | Separação Inercial/Filtração ou equivalente |

*A fumaça é o poluente atmosférico que contém o carbono negro, vulgarmente conhecido como fuligem.

**Não deve ser exercido mais que uma vez ao ano.

Considerando que o crescimento da frota de veículos está relacionado com o aumento das emissões de poluentes do ar nas cidades, o PRONAR incorporou o chamado Programa de Controle da Poluição por Veículos Automotores (PROCONVE). O PROCONVE atualiza os padrões da frota brasileira com o objetivo de reduzir e controlar a poluição e a emissão de ruído por veículos automotores.

Na esfera estadual existem várias políticas e ações coordenadas para minimizar os efeitos da poluição atmosférica no ambiente urbano, e o monitoramento da qualidade do ar é a principal delas. Em Aracaju, o monitoramento da qualidade do ar é da competência da Administração Estadual do Meio Ambiente de Sergipe (ADEMA), a qual publica semanalmente na internet¹¹ as condições do ar a partir de uma estação de recolha. A publicação da ADEMA baseia-se na compreensão de um índice de qualidade do ar concebido pelo *Pollutant Standards Index* (PSI) que é usado largamente nos Estados Unidos e no Canadá. Uma vez definida a concentração de um poluente, ele recebe uma qualificação de acordo com as seguintes condições: *Boa* entre 0 a 50 $\mu\text{g m}^{-3}$, *Regular* entre 51-100 $\mu\text{g m}^{-3}$, *Inadequada* entre 101-199 $\mu\text{g m}^{-3}$, *Má* entre 200-299 $\mu\text{g m}^{-3}$, *Péssima* $x > 299 \mu\text{g m}^{-3}$. A ADEMA também estabelece o plano de emergência para episódios críticos de poluição do ar com o objetivo de prevenir a população dos efeitos na saúde (Tabela 15).

¹¹ <http://www.adema.se.gov.br/leitura/15/39/%C3%8Dndice-da-qualidade-do-ar>.

Tabela 15: Critério para os episódios agudos de poluição do ar em Aracaju, segundo a ADEMA.

| Parâmetros | Atenção | Alerta | Emergência |
|--|---------|--------|------------|
| Particulados Totais em Suspensão (PTS) - $\mu\text{g m}^{-3}$ | 375 | 625 | 875 |
| Dióxido de Enxofre - $\mu\text{g m}^{-3}$ | 250 | 420 | 500 |
| Fumaça - $\mu\text{g m}^{-3}$ | 800 | 1600 | 2100 |
| Partículas inaláveis (MP_{10}) - $\mu\text{g m}^{-3}$ | 250 | 420 | 500 |

Na esfera municipal existe em Aracaju o Plano Diretor de Mobilidade (PlanMob). Idealizado em 2015, o PlanMob procura desenvolver ações de mobilidade urbana adequadas à sustentabilidade ambiental, entre elas políticas de incentivos aos programas voltados para o monitoramento permanente da qualidade do ar e controle da emissão de poluentes atmosféricos. O PlanMob reconhece o uso massivo do automóvel como fonte de poluição do ar e o seu impacto ambiental e humano.

Segundo Bhatia e Rivard (2008, p.14) o potencial perigo de poluição atmosférica associado aos veículos motorizados existe se a média diária de volume de tráfego de veículos numa via exceder os seguintes limites:

- I. 100 mil veículos por dia num raio de 150 metros;
- II. 50 mil veículos por dia num raio de 100 metros;
- III. 10 mil veículos por dia num raio de 50 metros.

A situação da frota de veículos de Aracaju pode sinalizar a existência de um potencial perigo associado à poluição do ar. Nas últimas décadas, a frota de veículos (motocicletas, automóvel, ônibus, caminhão e caminhonete) mostrou um crescimento substancial desde 2003, atingindo mais de 250 mil veículos em 2016. Isso equivale proporcionalmente a 1 veículo para cada 2 habitantes. Atualmente, quase 90% da frota é formada por veículos do transporte individual, automóveis e motocicletas, com expressão maior para os automóveis, que representam 66% dos veículos circulantes na cidade (Figura 36).

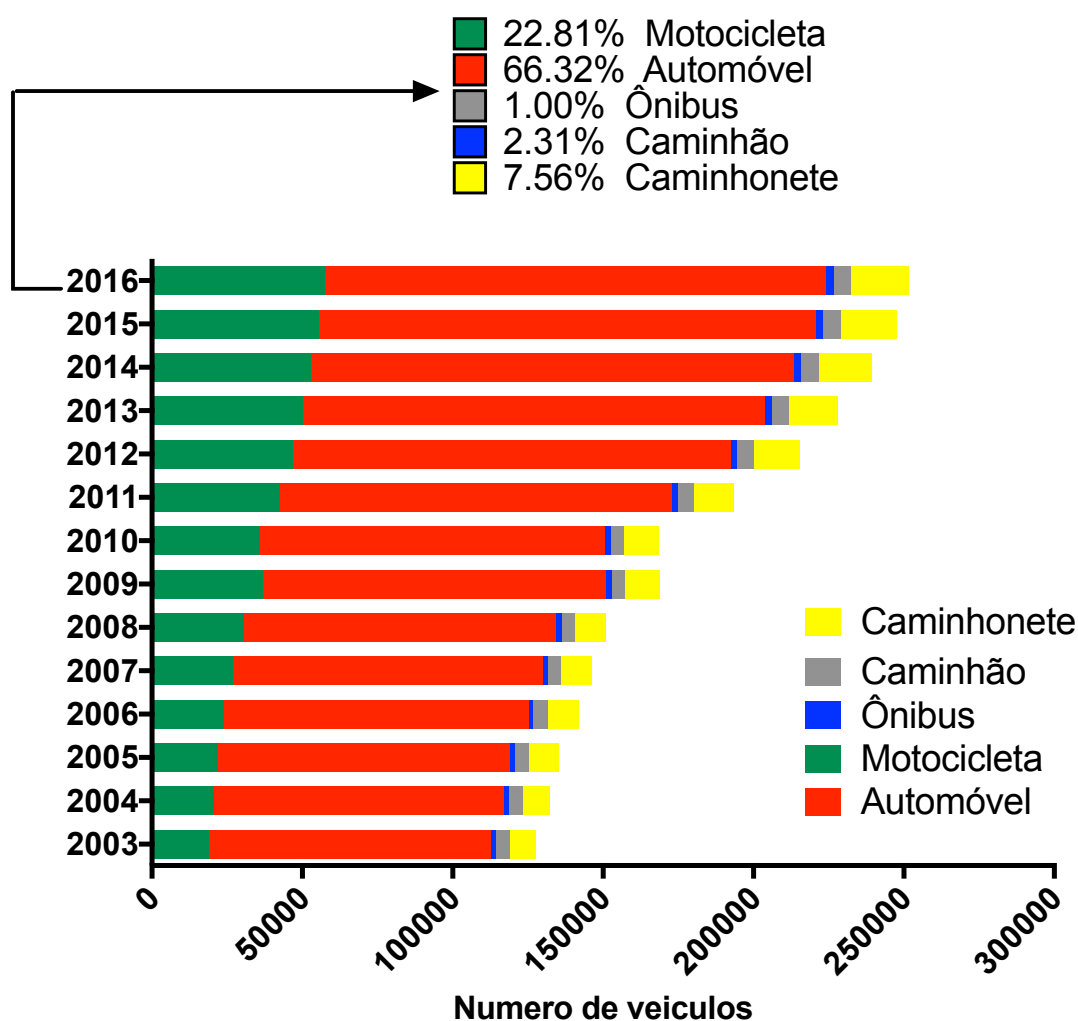


Figura 36: Evolução da frota de veículos por categoria em Aracaju 2003-2016.
Fonte: Departamento Estadual de Trânsito de Sergipe – DETRAN/SE, 2016.

A combustão do diesel e gasolina através do exaustor do motor gera uma mistura complexa de partículas e gases. Quando suspensas na atmosfera e se forem inaladas, estas partículas e gases podem causar efeitos adversos para a saúde prejudicando os processos bioquímicos ou fisiológicos do corpo humano. As emissões provenientes do escape dos veículos incluem, além de outros, o monóxido de carbono (CO), o ozônio (O₃) e o material particulado (MP), entre outros. Esses poluentes são considerados pela legislação brasileira como passíveis de políticas e ações de controle e regulamentação e, por isso, são usados regularmente como indicadores de qualidade do ar.

O MP é um dos principais poluentes atribuídos diretamente à emissão dos veículos motorizados e consiste no conjunto de partículas, sólidas e líquidas, como poeira, sujeira e fumaça suspensas na atmosfera com tamanhos que variam entorno dos 100 µm (visível ao olho nu) até 0.1 µm (visíveis por

meio de microscópio eletrônico). O MP é classificado através de partículas com diâmetro inferior a 10 μm (MP_{10}) ditas como inaláveis e por partículas ultrafinas com diâmetro inferior a 2.5 μm ($\text{MP}_{2.5}$). O padrão excelente de medição da qualidade do ar é geralmente baseado no $\text{MP}_{2.5}$, estudos recentes têm apresentado evidências que o $\text{MP}_{2.5}$ é mais prejudicial do que o MP_{10} , pois quanto menor é a partícula mais fácil é ela entrar no sistema respiratório e prejudicar o funcionamento do corpo humano (Guttikunda et al., 2013abc). O problema de muitas cidades, como é caso de Aracaju, é que ainda não contam com um monitoramento sistemático de $\text{MP}_{2.5}$ e, em alternativa, usam dados de MP_{10} no seu quadro avaliativo da qualidade do ar. Neste estudo, o MP_{10} foi escolhido como indicador da qualidade do ar em Aracaju uma vez que tem efeitos na saúde humana e as suas concentrações podem ser estimadas com eficácia através de modelos de concentração e dispersão de poluentes.

Recentemente, a OMS advertiu sobre o aumento crítico nas médias anuais de MP_{10} e $\text{MP}_{2.5}$ em 3.000 centros urbanos de 103 países no período entre 2008 a 2015 (OMS, 2016). Estudos epidemiológicos (cardiovasculares, cardiopulmonares, respiratórios e de mortalidade) têm evidenciado constantemente os efeitos adversos na saúde humana devido ao aumento das concentrações de MP_{10} (Pope et al. 1995; Samet et al. 2000; Atkinson et al. 2001; Ostro et al. 2006; Dapper et al. 2016). Fazendo uma revisão sumária dos estudos clínicos, Dockery e Pope (1994) sugeriram que um aumento de 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ em MP_{10} (média de 24 h) está relacionado com uma taxa de 3,4% no aumento da mortalidade respiratória e com o aumento de 1,4% na mortalidade cardiovascular. Gouveia et al., (2006) analisaram a associação entre o MP e as internações hospitalares no Município de São Paulo e constataram que um aumento de 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ de PM está associado ao incremento de 4,6% nas internações por asma em crianças, de 4,3% por doença pulmonar obstrutiva crônica e de 1,5% por doença isquêmica do coração em idosos. Na cidade, o perigo da poluição do ar associado às concentrações de PM_{10} está geralmente localizado nas proximidades das vias com tráfego intenso. As mais recentes investigações epidemiológicas têm identificado, dentro dum raio entre 100 a 300 metros a partir da fonte emissora, grupos vulneráveis como os idosos e crianças (Brunekreef et al., 1997; Venn et al. 2001; Martins et al., 2001; McConnell et al. 2006; Newman et al. 2014).

1.2 Escalas de análise e controles atmosféricos

A poluição do ar existente na cidade e os seus efeitos na saúde variam consideravelmente no espaço e no tempo. Na escala global é onde se controla a físico-química da atmosfera, enquanto na escala regional influenciada pelos

sistemas atmosféricos é onde ocorre o transporte, a dispersão e a transformação dos poluentes. A essa escala, a cidade aparece como uma fonte de poluição pontual. À escala local e micro, por sua vez, as fontes de emissão alteram-se em função das atividades humanas desenvolvidas, destacando-se as emissões provenientes dos veículos nas vias de intenso tráfego. Em relação à temporalidade, os padrões das atividades humanas e os controles meteorológicos sinóticos influenciam as concentrações de poluentes mediante os ciclos anuais, semanais e diurnos.

No que diz respeito aos controles atmosféricos, a estabilidade atmosférica e o vento são os dois parâmetros mais importantes na dispersão, diluição, transporte e deposição dos poluentes. No ambiente atmosférico instável em que ocorre uma forte turbulência (impulsos do movimento ar vertical e horizontal), a dispersão dos poluentes ou a “pluma” é usualmente maior (Figura 37). Inversamente, no ambiente atmosférico estável a dispersão dos poluentes é dificultada pelas fortes inversões térmicas, a turbulência é suprimida e a subida do *momentum* é efectivamente dificultada, levando a maiores concentrações de poluentes em certas áreas dentro da cidade (Oke, 1987).

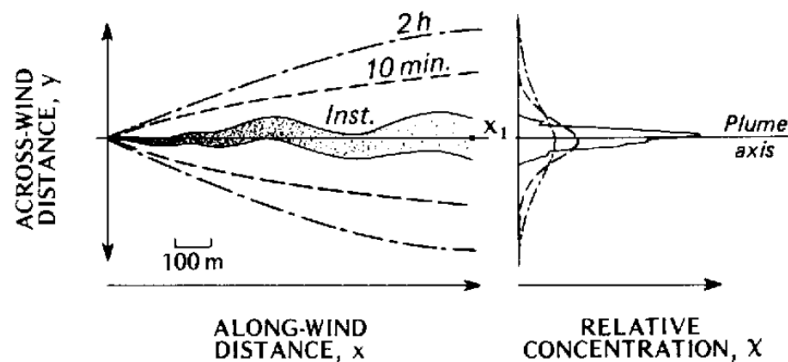


Figura 37: Vista no plano da variação perpétua da direção do vento e os contornos aproximados de uma pluma de fumaça quando observada instantaneamente em média em períodos de 10 minutos e 2 horas (adptado de Oke, 1987).

Para definir qual é a condição de estabilidade da atmosfera num determinado momento, usa-se o conhecido método de Pasquill-Gifford (P-G) o qual abrange seis classes de estabilidade (A-F) da atmosfera instável a muito estável. Posteriormente, esse método foi reformulado por Turner (1964), passando a ser chamado o método de Pasquill–Turner (PTM) em que classifica as classes de estabilidades da atmosfera em função da insolação, da velocidade do vento e da nebulosidade. Além de ser simples e fácil de usar, esse método é a base fundamental de muitos modelos de dispersão atmosférica nas áreas urbanas (Turner, 1997).

Ao vento é atribuído um papel relevante, não só na dispersão através da sua influência na estabilidade atmosférica, mas também na difusão (diluição) e no transporte dos poluentes. Sabe-se que quanto maior é a velocidade do vento, maior é a atividade de turbulência e, conseqüentemente, maior é a diluição dos poluentes pelo efeito “alongamento” (*stretching*) e maiores são as distâncias dos poluentes movidos de sua posição inicial (Oke, 1987). Em contrapartida, existe frequentemente um maior potencial para a poluição com ventos fracos, pois o transporte horizontal e a difusão turbulenta são comprimidos (Oke, 1987). Porém, o transporte é também influenciado pela direção do vento, que dependendo da configuração do sítio pode resultar em áreas com acumulação de poluentes.

A característica eminentemente térmica da cidade modifica as condições de estabilidade ou instabilidade na camada limite que lhe sobrepõe, bem como dificulta a circulação do ar pela rugosidade dos elementos (z_0) e topografia que lhes assenta (Lopes, 2003). Os edifícios criam barreiras à dispersão e ao transporte de poluentes principalmente as vias ou *canynos* urbanos estreitos (onde a relação entre altura e largura dos edifícios (H/W) é alta). Esses locais são propícios à acumulação de poluentes devido à turbulência e ao vento serem restritos, ao passo que nas vias mais largas e abertas aos ventos dominantes, os poluentes são facilmente removidos das estruturas urbanas (Figura 38 (a)(b)).

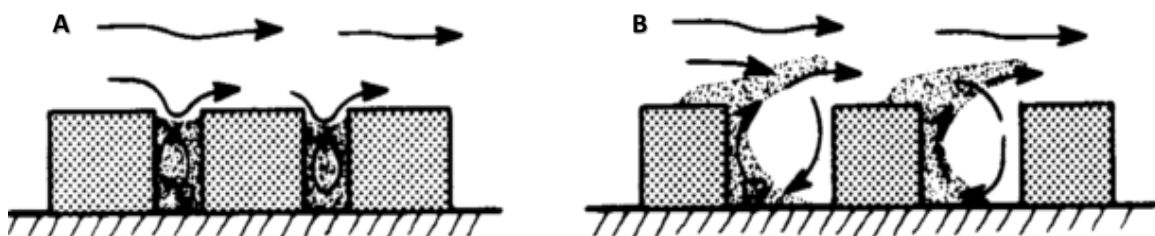


Figura 38: A influência dos edifícios na poluição do ar urbana (adaptado de Oke, 1987, p.273).

Nas regiões costeiras as condições atmosféricas são frequentemente moldadas ao gosto dos sistemas de mesoescala especialmente pela circulação das brisas marítimas. A influência da brisa marítima sobre a qualidade do ar passa pelo entendimento das condições atmosféricas dentro da camada limite interna convectiva (*Convective internal boundary layer* – CIBL) onde é atribuída a causa dos problemas persistentes de poluição do ar nas cidades costeiras (Miller et al., 2003). Segundo Miller et al. (2003), a CIBL é uma região instável dentro da massa de ar marinho aparecendo na costa e crescendo em profundidade com a distância para o interior, onde os poluentes

ficam presos e concentrados em baixo nível (ver a Figura 1 do capítulo 1). Na CIBL ocorrem três tipos especiais de condições de fluxo que têm um grande impacto na dinâmica dos poluentes (Papanastasiou e Melas, 2009): *estagnação*, em que o fluxo de ar reduz a velocidade ou cessa completamente permitindo o aumento dos níveis de concentração de poluentes próximo da fonte emissora; *recirculação* no qual o ar poluído é inicialmente transportado para longe da fonte emissora, mas é re-advectado de volta por um sistema de circulação local; *ventilação* no qual o ar poluído numa região é diluído ou removido por um ar mais limpo.

Nesse contexto, o desenvolvimento da brisa marítima pode definir cenários mais complexos de poluição do ar. Inúmeros estudos têm sinalizado mais o cenário caracterizado pela elevação nos níveis de poluentes de MP_{10} . Em Volos, na Grécia, Papanastasiou e Melas (2009) verificaram que a brisa marítima está associada a um aumento médio até $12 \mu g m^{-3}$ nos níveis de concentração de MP_{10} , quando comparados aos dias sem brisa marítima. Em Atenas, esse aumento nas concentrações de MP_{10} representou até 31% durante os eventos de ondas de calor, como demonstrou Papanastasiou et al. (2010). As razões que impelem a cenários de poluição do ar desfavoráveis prendem-se com o fato que a brisa marítima (Oke, 1987; Lopes, 2003, p.66):

- Estar geralmente associada a baixa velocidade do vento variando normalmente entre $4-7 ms^{-1}$. Num perfil diurno, o valor mínimo da velocidade do vento é observado, normalmente, nas primeiras horas, depois do nascer do sol, quando prevalece a estabilidade atmosférica com pouca turbulência, sendo assim pouco eficaz na remoção dos poluentes. Se coincidir com a hora de pico (*rush hours*) do tráfego de automóveis, tem-se, nas horas da manhã, provavelmente, condições meteorológicas para um cenário de acumulação de poluentes;
- Ser um sistema fechado onde uma determinada direção do fluxo à superfície pode ser compensada em altura por um fluxo de direção oposta, perpetuando o transporte dos poluentes apenas dentro desse sistema, não renovando completamente o ar;
- Compõe ritmos cíclicos nomeadamente a brisa terrestre com direção oposta durante a noite.

O conhecimento sobre os controles atmosféricos juntamente com a densidade de tráfego e a natureza do poluente constituem informações fundamentais nos modelos de dispersão poluentes do ar nas cidades.

1.3 Modelos de dispersão de poluentes

Para conhecer as taxas de concentração de poluentes nas cidades, várias técnicas têm sido empregues como o monitoramento de poluentes, as medições móveis, modelos estatísticos e a análise de dispersão (Jerrett et al. 2005; Ross et al. 2007; Elen et al. 2013; Peters 2013; Van et al., 2013). Em alternativa ao insuficiente monitoramento, os modelos de dispersão/concentração destacam-se como uma ferramenta útil e complementar nas estimativas das concentrações de poluentes. Os modelos de dispersão urbanos levam em consideração a emissão de veículos, focando-se nas vias e assumindo-as, dessa forma, como uma fonte de configuração em forma de linha. Ao nível do solo, as concentrações de poluentes de fonte linear dependem fortemente da densidade de tráfego, do comprimento da exaustão dos veículos num determinado segmento viário, bem como dos tipos de condução e do veículo. A vantagem dos modelos de dispersão em forma de fonte de linha é que, os resultados podem ser relacionados com efeitos adversos na saúde humana (Jerrett et al., 2005), o desempenho desse tipo de modelo tem sido avaliado como satisfatório comparando as emissões de poluentes estimadas com as medidas em campo (Yura, 2007; Zhou, 2007).

O CalRoads destaca-se entre os modelos de dispersão de fonte de linha mais usados na atualidade. Desenvolvido pelo departamento de transportes da Califórnia, a interface CalRoads compõe os modelos CALINE4 (*California Line Source Dispersion Model version 4*) e suas versões complementares CAL3QHC e CAL3QHCR (Benson, 1984, USEPA, 2008). O CAL3QHC (*California Line Source for Queuing & Hot Spot Calculations Refined*) usado neste estudo incorpora um algoritmo de tráfego que calcula o total de concentração de MP_{10} (e CO) a partir dos veículos em movimento e dos veículos nas filas de interseções com semáforo, semelhantes a muitas vias em Aracaju. Além disso, o CAL3QHC é recomendado por diversas agências internacionais como o modelo preferencial na modelização da qualidade do ar (por exemplo, pela Agência de Proteção Ambiental Americana e pelo Departamento de Planeamento da Cidade de São Francisco) e por ter gerado previsões das concentrações de MP_{10} satisfatórias (Mishra e Padmanabhamutry 2003; Gokhale e Raokhande 2008). No Brasil, há uma tendência crescente de estudos que utilizam o CAL3QHC como modelo de dispersão atmosférica veicular, como no caso da cidade de São Paulo (Sánchez-Ccoyllo et al., 2009), Belo Horizonte (Tavares et. al., 2010) e Maringá (Lima et al., 2010).

A base fundamental do CAL3QHC é o modelo de dispersão Gaussiana que considera a taxa de emissão de uma fonte numa altura efetiva acima do solo. A pluma gaussiana pode ser representada pela equação (Briant et al., 2013):

$$C(x, y, z) = \int_{y_1}^{y_2} \frac{Q}{2\pi u \sigma_y(s) \sigma_z(s)} \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2(s)} - \frac{(y-s)^2}{2\sigma_y^2(s)}\right) ds \quad (10)$$

onde

C = estado constante de concentração em um ponto (x, y, z) ($\mu\text{g m}^{-3}$); y é a distância horizontal da linha central da pluma (m) e z é a distância vertical a partir do nível do solo (m);

Q = taxa de emissão ($\mu\text{g s}^{-1}$);

y_1 e y_2 = ordenadas das extremidades das fontes;

u = velocidade do vento (ms^{-1});

σ_y, σ_z = desvio padrão representando a dispersão de poluentes na direção transversal à direção do vento que representa a distância horizontal e vertical dos poluentes com dependência do grau de estabilidade atmosférica convectiva.

Para caracterizar a dispersão de poluentes de um segmento viário aplica-se a concepção gaussiana ao conjunto de características como as condições meteorológicas, o tipo do poluente, e a taxa de emissão veicular dentro de uma zona de mistura. A zona de mistura considera a região ente a largura da via percorrida (pista), acrescida de mais 3 metros (ajuste de dispersão horizontal) de cada lado em que a emissões e a turbulência são uniformes (Benson, 1989). Dentro dessa zona existem dois mecanismos de dispersão: a turbulência mecânica criada pelos veículos em circulação e a turbulência térmica alimentada pelos escapes quentes dos veículos. Para ajustar ao modelo padrão de dispersão gaussiana, o modelo CAL3QHC considera o parâmetro de dispersão vertical inicial (SGZI) e o tempo de permanência do poluente na zona de mistura (TR) (Benson, 1989) (Figura 39).

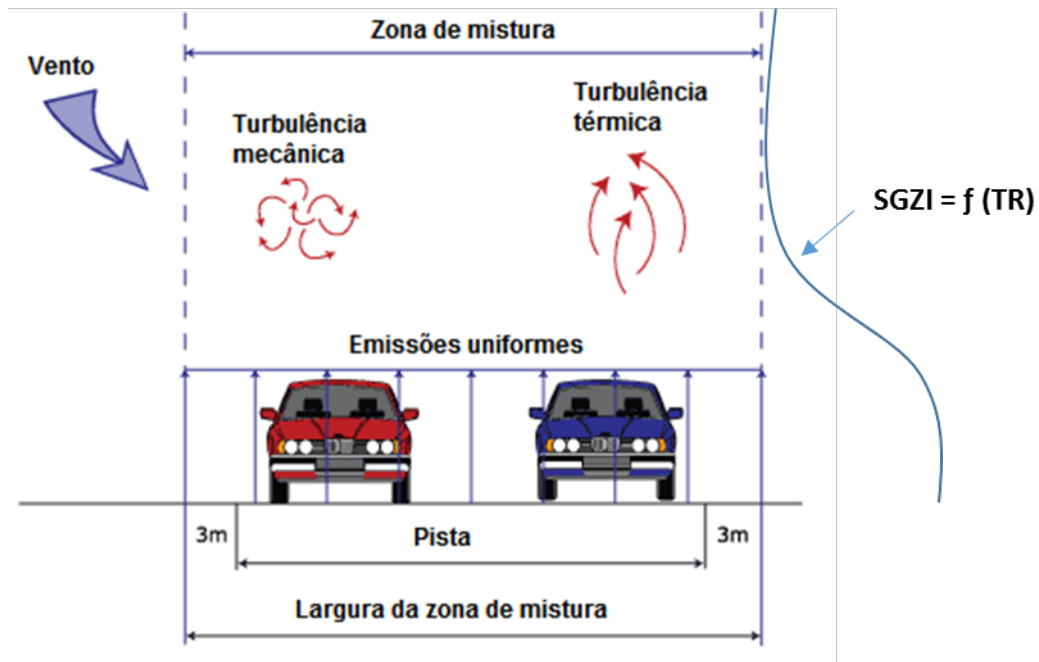


Figura 39: Zona de mistura usada no cálculo das concentrações de poluentes atmosféricos próximo a vias. Adaptação do manual do usuário CALroads (Copyright © 2001-2008 Lakes Environmental Software).

A combinação entre o modelo gaussiano e a zona de mistura implica algumas proposições: (i) as taxas de emissão de poluentes são constantes e quaisquer flutuações nas emissões são ignoradas; (ii) em relação às condições meteorológicas assume-se que a velocidade e a direção do vento, incluindo a estabilidade atmosférica, são constantes; apesar que existirem vias onde o vento é velozmente canalizado (efeito chamado “venturi”) as concentrações dos poluentes podem tomar proporções variadas; (iii) as concentrações de poluentes são inversamente proporcionais à velocidade do vento na mesma direção, decaindo à medida que as concentrações se afastam da fonte emissora até 500 metros (Caltrans, 1989; Zhou, 2007).

Nesse sentido, no âmbito das orientações climáticas de Aracaju é crucial que verifique se existe um problema de poluição do ar na cidade identificando as áreas potencialmente perigosas. A análise deste estudo é exploratória e é uma abordagem inicial feita com modelação, contudo, sem a devida validação.

2 Objetivos

O objetivo é avaliar a qualidade do ar em Aracaju através das estimativas das concentrações de MP_{10} emitidas nas vias de intenso tráfego de automóveis na área central da cidade, utilizando o modelo CAL3QHC. Para isso, este estudo tem os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a série de dados de poluentes atmosféricos monitorados por uma estação de qualidade do ar;
- Elaborar mapas de concentração de MP_{10} próximo às vias em dois períodos diários de picos de tráfego de automóveis;

Os resultados desses objetivos procuram responder a uma questão importante em termos de planejamento urbano e saúde pública:

- De fato, existe um problema de poluição do ar em Aracaju?

3 Materiais e métodos

3.1 Dados para a análise dos poluentes monitorados

Dados semanais da estação de recolha localizada na área industrial (a uma distância de 6 km do centro da cidade) foram analisados entre o período 2013 a 2015. Os dados de fumaça, partículas totais em suspensão (PTS) e MP_{10} são propriedade da ADEMA, sendo que as amostras dos volumes desses poluentes passaram por um rigoroso procedimento (apresentados na Tabela 14) para determinar a concentração do poluente particular (Figura 40 (a)).

3.2 Dados de entrada do modelo CAL3QHC

3.2.1 Geometria do link e receptores

Os links representam os segmentos direcionais de uma via em que são constantes a largura, a altura, o volume de tráfego e o fator de emissão veicular (Caltrans, 1989). Os links são de dois tipos: o *free link* em que a circulação do veículo é livre (não semaforizada) e o *queue link* em que a circulação do veículo é em fila (semaforizada) (Figura 40 (b)). Dependendo da via, curva ou bidirecional pode conter mais que um link ao qual se associam algumas informações: (i) adotou-se o tipo de via *at grade*, em que o modelo assume para as emissões que o solo atua como uma barreira física e só permitirá expandir para fora (*outward*) e para cima (*upward*), e (ii) largura padrão de 12 metros da “zona de mistura” foi usada, compreendendo 9 metros de pista (*lane*) e tendo adicionados 3 metros horizontalmente em cada lado, em que nenhum dos receptores deve estar localizado (Benson, 1989). Os receptores (ou indivíduos) são pontos nas coordenadas X, Y e Z, em que são contabilizadas as estimativas das emissões de MP_{10} . Jerrett et al. (2005) mostraram a partir de vários estudos que o volume de tráfego e as distâncias em relação às vias são os principais indicadores das estimativas de exposição nociva à poluição. Esses autores usaram *buffers* em diferentes distâncias das vias (por exemplo 0-

50, 50-100 e 100-200 metros) para avaliar a mudança das distâncias nos efeitos atribuídos à saúde, e mostraram que o padrão de risco decresceu com o aumento das distâncias a partir da via. Neste estudo, foram selecionados os receptores próximos a zona de mistura do modelo em que as distâncias não ultrapassaram 50 metros. A altura de 1.8 metros do receptor (respiração humana) foi usada para representar a exposição do indivíduo às concentrações de MP_{10} . Os locais dos receptores na área modelada representam na realidade as calçadas adjacentes, cruzamentos, áreas residenciais ou estruturas físicas às quais o pedestre é susceptível de ter contato contínuo com os poluentes.

Neste estudo foram criados 164 links e 60 receptores para estimar as concentrações de MP_{10} que corresponde a um total de 35 vias modeladas na área central da cidade. Foram consideradas as principais vias com alta intensidade de veículos na cidade e que foram efectuadas contagem do volume de automóveis e onde o fluxo diário de pedestres é elevado, o que aumenta a exposição aos efeitos nocivos da poluição (Figura 40 (c)). O volume de tráfego (vph) para cada via modelada foi fornecido pela Superintendência Municipal de Transportes e Trânsito de Aracaju (SMTT) decorrente da contagem de tráfego no período de 1 de abril a 15 de maio de 2014. Considerou-se o volume de veículos por hora (vph) referente à soma de contagem do fluxo de automóveis relativo a dois picos de tráfego diário: início da manhã (entre as 07:00-09:00h local) e início da noite (entre as 17:00-19:00h local). Assim, as simulações ocorreram nesses dois horários (doravante chamados de manhã e noite, respectivamente) considerando os piores casos de poluição do ar esperados na cidade.

No que diz respeito às informações sobre a sinalização, é recomendado o uso de informações medidas em campo ou a partir de profissionais com adequado conhecimento do tráfego local. No entanto, na ausência dessas fontes de informação recorreu-se aos valores usados na cidade de Campinas-SP por Zambonini (2000) a saber: 100 segundos para o ciclo semafórico, 54 segundos para o estado vermelho e 4 segundos de intervalo para o estado amarelo. Quanto aos valores referentes ao tipo de sinal (*pre-timed*), taxa de saturação de tráfego (1600 veículos passando em sinal verde) e tipo de aproximação (*average progression*) seguiram-se com as recomendações padrão do modelo CAL3QHC (US EPA, 1992).

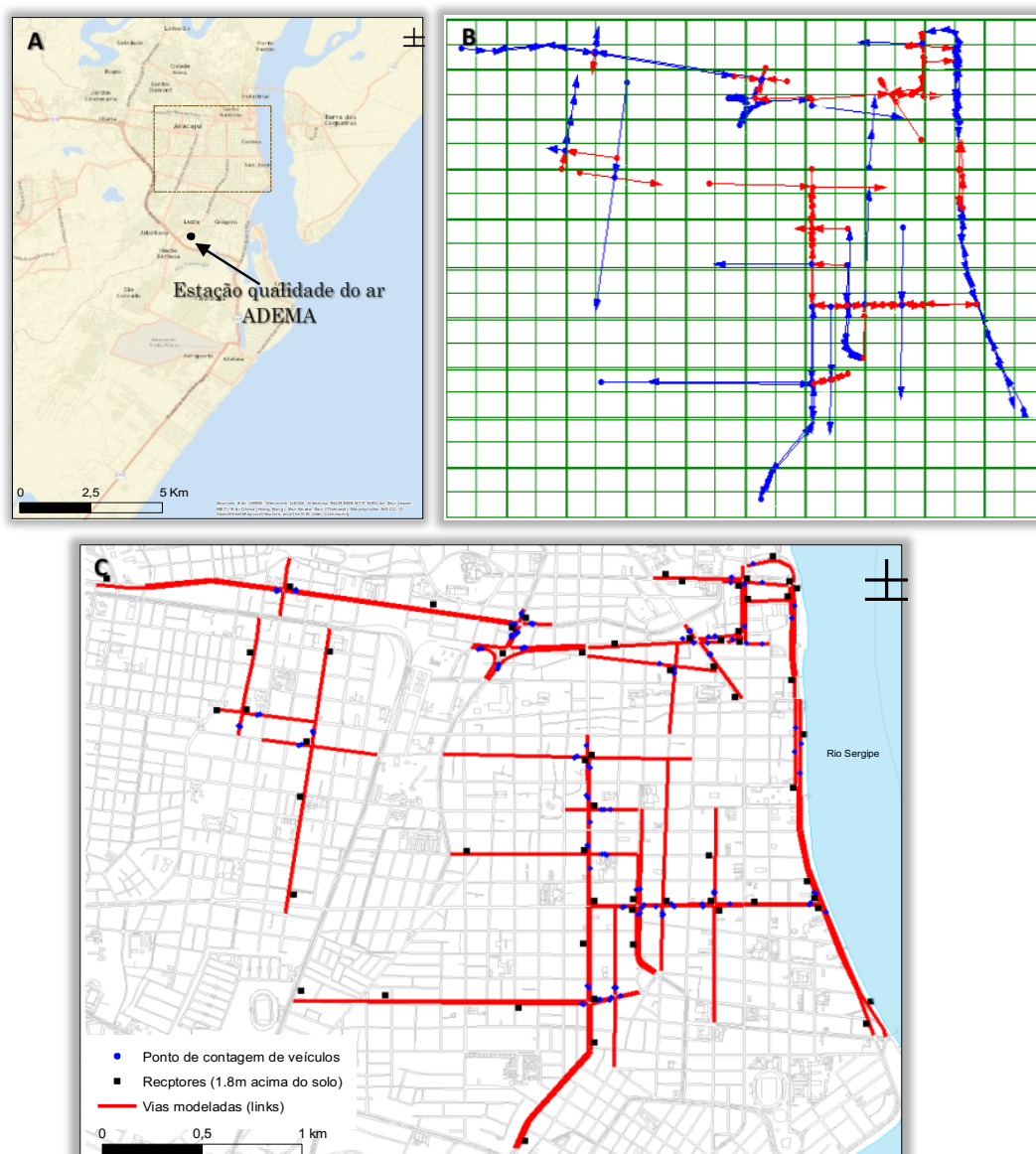


Figura 40: Projeção da área de estudo (A), geometria da configuração dos links dentro do modelo CAL3QHC (B) e vias modeladas e localização dos receptores na área central da cidade (C).

3.2.2 Fator de emissão

O fator de emissão (FE) corresponde à massa de poluentes por quilômetro andado pela viatura. O FE é o parâmetro central no modelo CAL3QHC, pois a concentração de poluentes é-lhe diretamente proporcional. Existem dois tipos: o FE para os veículos em movimento (*free flow link*) medido em g km^{-1} e o FE para os veículos parados ou em filas (*queue link*) medido em g h^{-1} . Na ausência de FE disponíveis para a área de estudo, recorreu-se a literatura especializada. Assim, nas estimativas de concentrações de MP_{10} em Aracaju foram usados: o FE de 0.047 g km^{-1} para os veículos em movimento que é recomendado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

(CETESB, 2008) por ser mais condizente com a frota de veículos nacional (Tavares et al., 2010), ao passo que para os veículos parados, foi utilizado o FE de 2.59 g h⁻¹ referente à última versão do modelo de FE – PARTE 5 da Agência de Proteção Ambiental Americana (US EPA, 1998).

3.2.3 Condições atmosféricas controladoras

As condições meteorológicas usadas durante as simulações foram representativas do verão 2015 que inclui os eventos de brisa marítima. A classificação de *dias com FBM* e *dias sem FBM* apresentada no capítulo 1 foi usada a fim de verificar a relação entre a frente de brisa e a poluição do ar. Como os dados do volume de veículo foram designados para dois específicos momentos do dia, optou-se por comparar nos dias com FBM e nos dias sem FBM os valores médios das variáveis meteorológicas (temperatura do ar, velocidade do vento, direção do vento e radiação solar) somente nos períodos previamente definidos como manhã e noite.

Analisando os dados da Tabela 16, verifica-se que os valores médios das variáveis meteorológicas diferem nos horários relativos aos picos diários manhã e noite nos dias de FBM e nos dias sem FBM. Desse modo, os parâmetros definidos nas estimativas das concentrações de MP₁₀ foram os seguintes: velocidade do vento de 2 ms⁻¹ para a simulação da manhã e 3.7 ms⁻¹ da noite, e a direção do vento de 95° (Leste) para ambos períodos. A associação entre os valores de velocidade do vento e radiação solar na Tabela 16 e conforme a classificação sugerida por Mohan e Siddiqui (1998) foram usadas as classes de estabilidade atmosférica de Pasquill–Turner do tipo “B” (moderadamente instável) na simulação da manhã e a classe “C” (levemente instável) na simulação da noite.

Tabela 16: Caracterização das condições meteorológicas usada nas simulações de poluentes MP₁₀.

| Variável ¹ | Simulação da manhã | | Simulação da noite | |
|---|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
| | Dia com FBM | Dia sem FBM | Dia com FBM | Dia sem FBM |
| Temperatura do ar (°C) | 28 | 27 | 27 | 26.7 |
| Velocidade do vento (ms ⁻¹) | 2 | 2.2 | 3.7 | 3.4 |
| Direção do vento (°) | 99 | 96 | 94 | 98 |
| Radiação (KJ m ⁻²) | 866 | 742 | 366 | 310 |

¹Dados meteorológicos referentes à estação padrão do INMET localizada fora da área do modelo.

Quanto à altura da camada de mistura, utilizou-se o valor de 1000m padrão do modelo CAL3QHCR uma vez que não existem dados referentes na área de estudo e porque os resultados das estimativas dos poluentes não são

afetados se a altura da camada de mistura está entre 100 e 1000 metros de altura (Caltrans, 1989).

A caracterização da rugosidade da superfície foi calculada a partir do software *Roughness Mapping Tools* (Gál e Unger, 2009, 2014; Unger et al., 2014) em que se definiu o valor médio de 150 centímetros para a área de estudo (ver capítulo 6). Ajustaram-se dentro do modelo em 0.003 cm s^{-1} os valores da velocidade de absorção e da velocidade de deposição (Benson, 1989) e a medida de 60 minutos para representar o pico diário das concentrações de MP_{10} da manhã e noite. As informações meteorológicas da direção do vento, velocidade do vento, classe de estabilidade da atmosfera e altura da camada de mistura foram assumidos na modelação como sendo homogêneos na área de estudo. Na Tabela 17 estão reunidas as principais informações de entrada no modelo CAL3QHC.

Tabela 17: Síntese dos dados e informações de entrada do modelo CAL3QHC.

| Variáveis meteorológicas | Valores/informações | Geometria da via | Valores/informações |
|---|--|--|---------------------|
| Rugosidade da superfície (cm) | 150 | Largura da via (zona de mistura) (m) | 12 |
| Velocidade de absorção (cm/s) | 0.003 | Fator de emissão para veículos em movimento (g km^{-1}) | 0.047 |
| Velocidade de deposição (cm/s) | 0.003 | Fator de emissão para veículos parados em fila (g h^{-1}) | 2.59 |
| Velocidade do vento (m/s) | 2.0 (simulação manhã) e 3.7 (simulação noite) “B” | Velocidade de tráfego (km/h) | 60 |
| Classe de estabilidade de Pasquill–Turner (A a F) | (moderadamente instável - simulação manhã) “C” (levemente instável - simulação noite) | Ciclo semafórico para cada fase (vermelho) (s) | 54 |
| Altura da camada de mistura (m) | 1000 | Fluxo de saturação (v/h) | 1600 |
| Tempo médio (minutos) | 60 | Tipo de sinal | Pre-timed |
| Direção do vento (°) | 90 | Tipo de aproximação dos veículos | Average progression |

3.3 Dados de saída do modelo CAL3QHC: mapa das concentrações de MP_{10}

Foram elaborados dois mapas representando os valores contínuos das concentrações estimadas de MP_{10} nos dois piores casos de poluição do ar (manhã e noite) nas principais vias de circulação da área central de Aracaju.

Os valores das concentrações simuladas de MP_{10} em cada segmento viário (links) encontram-se concentrados em cada receptor. Dessa maneira, todos os receptores do modelo CAL3QHC foram exportados em formato vetor para o ambiente SIG e processados com a ferramenta *spatial analysis* (ARCGIS) pelo método “*Ordinary kriging interpolation*”. Este método é recomendado como a melhor opção no cálculo das estimativas de exposição principalmente pela produção de valores previstos e erros-padrão em locais não amostrados (Jerrett et al., 2005). Em seguida a interpolação, usou-se a função “*extract mask*” a fim de extrair os valores das concentrações de MP_{10} e representá-las dentro das vias modeladas uma vez que o CAL3QHC não considera o efeito dos edifícios nas concentrações estimadas.

4 Resultados

4.1 Análise dos dados semanais monitorados

A Figura 41 apresenta dados de três poluentes atmosféricos a partir de uma estação de recolha na cidade, onde se mostra que no período entre 2013 e 2015 as concentrações semanais de Particulados Totais em Suspensão (PTS) variaram entre $37 \mu\text{g m}^{-3}$ e $103 \mu\text{g m}^{-3}$ e as de fumaça houve um aumento nos níveis de $2.5 \mu\text{g m}^{-3}$ para $13 \mu\text{g m}^{-3}$. Quanto às concentrações de MP_{10} , verificou-se a média de $30 \mu\text{g m}^{-3}$ e máxima de $44 \mu\text{g m}^{-3}$ durante o período analisado.

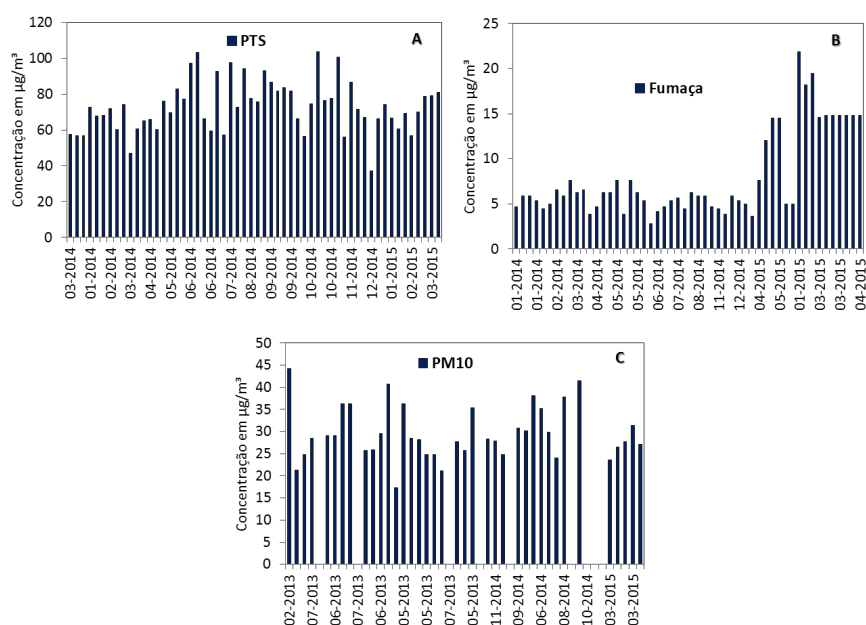


Figura 41: Dados semanais das concentrações de PTS, fumaça e MP_{10} medidos a partir de uma estação de monitoramento da qualidade do ar em Aracaju no período entre 2013 a 2015. Fonte: ADEMA, 2016.

4.2 Simulação das concentrações de PM₁₀ no período da manhã

A Tabela 18 apresenta as 10 vias com as maiores concentrações de MP₁₀ na simulação da manhã, na qual contém o número de veículo/hora e a orientação da rua. O número de veículo/hora está diretamente ligado às concentrações de MP₁₀, pelo que se observa o fluxo de veículo variando entre as vias com tráfego de 13.646\hora na Rua Av. Coelho e Campos a 8078 na Rua Zaquel Brandão.

O mapa da Figura 42 mostra as concentrações de MP₁₀ estimadas pelo modelo CAL3QHC para as manhãs do verão 2015. Nota-se claramente na área central da cidade a presença de vários pontos críticos de poluição do ar considerados como possíveis *hot-spots*. Nesta análise considera-se um *hot-spot* o local onde as concentrações estimadas de MP₁₀ violam a condição de boa qualidade do ar estabelecida pela CONAMA notadamente a partir de 50 µg m⁻³. Com base nisso, foi verificado um *hot-spot* com valor máximo de 120 µg m⁻³ de MP₁₀ nas imediações da rua Av. Coelho e Campos cruzamento com a Rua Apulcro Mota, cujo valor corresponde à condição do ar *inadequada* do SPI (101-199 µg m⁻³). Na mesma lógica, foi verificada a condição *regular* (51-101 µg m⁻³) na Rua Acre (87 µg m⁻³), na parte Sul da Av. Hermes Fontes (84 µg m⁻³), na parte Sul da Av. Ivo do Prado (82 µg m⁻³), na Av. Pedro Calazans cruzamento com a Rua Estância (72 µg m⁻³), e nas imediações das Ruas Santa Luzia e Laranjeiras com valores entre 68 e 62 µg m⁻³, respectivamente.

Tabela 18: As 10 vias de circulação com as maiores concentrações de MP₁₀ na manhã do verão 2015 baseadas no modelo CAL3QHC.

| Estimativa da manhã | | Segmento da via | | |
|--|----------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| MP ₁₀ (µg/m ³) | Receptor | Descrição | Nº de automóveis/hora | Orientação da via |
| 120 | Rcpt_4 | Av. Coelho e Campos/Rua Apulcro Mota | 13.646 | W-E |
| 87 | Rcpt_56 | Rua Acre | 12.632 | N-S |
| 84 | Rcpt_30 | Av. Hermes Fontes - parte Sul | 13.592 | SW-NE |
| 82 | Rcpt_40 | Av. Ivo do Prado - parte Sul | 12.607 | N-S |
| 72 | Rcpt_24 | Av. Pedro Calazans /Rua Estância | 10.257 | N-S |
| 68 | Rcpt_38 | Rua Santa Luzia | 8.377 | N-S |
| 62 | Rcpt_39 | Rua Laranjeiras | 9.926 | W-E |
| 54 | Rcpt_8 | Av. Ivo do Prado - parte Norte | 9.001 | N-S |
| 53 | Rcpt_29 | Rua Zaquel Brandão/Av. Hermes Fontes | 8.078 | W-E |
| 43 | Rcpt_59 | Av. Semão Sobral | 8.696 | W-E |



Figura 42: Concentrações de MP_{10} nas vias de circulação na área central da cidade, estimadas pelo modelo CAL3QHC referente ao pico de fluxo de automóveis na manhã (07:00-09:00h - local) durante o verão de 2015.

4.3 Simulação das concentrações de PM_{10} no período da noite

A tabela 19 apresenta as 10 vias com as maiores concentrações de MP_{10} no período da noite bem como o número de automóveis variando entre 13.395 na Rua Acre a 4781 na Rua Santa Luzia.

O mapa da Figura 43 mostra as concentrações de MP_{10} estimadas pelo modelo CAL3QHC para as noites do verão de 2015, onde foi possível verificar a continuação de vários *hot-spots* do período anterior. A máxima concentração de MP_{10} foi registrada na Rua Acre com $84 \mu\text{g m}^{-3}$, cujo valor corresponde à condição do ar *regular* do SPI ($51\text{-}101 \mu\text{g m}^{-3}$). Nesta categoria seguiram a Rua Zaquel Brandão cruzamento com a Av. Hermes Fontes ($72 \mu\text{g m}^{-3}$), a Av. Marechal M. de Moraes com Ivo do Prado ($69 \mu\text{g m}^{-3}$), a Rua Laranjeiras ($59 \mu\text{g m}^{-3}$) e as vias R. Max G. de Oliveira/Rua Acre e Av. G. Prado Rollemberg, ambas com $58 \mu\text{g m}^{-3}$ e $55 \mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente.

Tabela 19: As 10 vias de circulação com as maiores concentrações de MP_{10} na noite do verão 2015, baseadas no modelo CAL3QHC.

| Estimativa da noite MP_{10} ($\mu g/m^3$) | Segmento da via | | | |
|---|-----------------|--|-----------------------|-------------------|
| | Receptor | Descrição | Nº de Automóveis/hora | Orientação da via |
| 84 | Rcpt_56 | Rua Acre | 13.395 | N-S |
| 72 | Rcpt_29 | Rua Zaquel de Bradão/Av. Hermes Fontes | 14.382 | W-E |
| 69 | Rcpt_3 | Av. Marechal M. de Moraes/Av. Ivo do Prado | 7.353 | W-E |
| 59 | Rcpt_39 | Rua Laranjeiras | 9.953 | W-E |
| 58 | Rcpt_23 | R. Max G. de Oliveira/Rua Acre | 1.069 | W-E |
| 55 | Rcpt_37 | Av. G. Prado Rollemberg | 2.955 | N-S |
| 48 | Rcpt_38 | Rua Santa Luzia | 4.781 | N-S |
| 40 | Rcpt_30 | Av. Hermes Fontes - parte Sul | 8.890 | SW-NE |
| 38 | Rcpt_59 | Av. Semão Sobral | 8.050 | W-E |
| 38 | Rcpt_28 | Av. Ivo do Prado/Av. Barão de Maruim | 10.995 | N-S |



Figura 43: Concentrações de MP_{10} nas vias de circulação da área central da cidade, estimadas pelo modelo CAL3QHC referente ao pico de fluxo de automóveis na noite (17:00-19:00h) durante o verão de 2015.

5 Discussão

A avaliação da qualidade do ar em Aracaju através dos dados monitorados e publicados semanalmente pela ADEMA sugere que o *status* da qualidade do ar é “aceitável”, uma vez que as concentrações dos poluentes (PTS, fumaça e MP_{10}) não superam os limites estabelecidos pelas normas nacionais. Todavia, se se considerar as concentrações de MP_{10} estimadas pelo modelo CAL3QHC o *status* da qualidade do ar está comprometido, respondendo à questão central que existe, de fato, um problema de poluição do ar em Aracaju. Os resultados revelaram que as concentrações de MP_{10} estimadas foram maiores que as observadas experimentalmente. Os valores de MP_{10} simulados correspondem as duas piores situações críticas de poluição do ar previstas ao longo do dia em condições meteorológicas típicas do verão 2015. É razoável supor que os resultados da simulação têm um peso expressivo na qualidade da análise, pois as emissões de poluentes são fruto dos automóveis que pode ser considerada a principal fonte de poluição do ar em Aracaju dada a volumosa quantidade de automóveis circulando pelas vias.

Além disso, foram constatados vários *hot spots* com níveis de emissão máxima de MP_{10} de $120 \mu\text{g m}^{-3}$ na área central de Aracaju durante a simulação da manhã e $84 \mu\text{g m}^{-3}$ na simulação da noite, cujas concentrações ultrapassam as normas nacionais enquadrando-as nas categorias do índice PSI como *inadequada* ($101\text{-}199 \mu\text{g m}^{-3}$) e *regular* ($51\text{-}101 \mu\text{g m}^{-3}$), respectivamente. Por exemplo, o valor de $120 \mu\text{g m}^{-3}$ de MP_{10} se exposto por longo período pode ter implicações negativas para a saúde humana, principalmente para determinados grupos de pessoas (idosos e crianças).

Cabe considerar que os resultados da simulação dependem fortemente da qualidade das informações do tráfego e dos controles atmosféricos usados no modelo CAL3QHC. Como foi visto, as maiores concentrações de MP_{10} tenderam para as vias com maior fluxo de veículos por hora (a exemplo das vias Av. Ivo do Padro, Av. Hermes Fontes e Rua Acre), isso porque o automóvel deslocando numa fonte linear (ou segmento de via) é assumido pelo modelo como a principal fonte de emissão de poluentes. O comprimento da via e a velocidade dos veículos (aumento das concentrações com a diminuição da velocidade) também influenciaram nos resultados simulados, pois observou-se uma tendência de altos níveis de MP_{10} relacionados com as vias de comprimento maior, embora as de comprimento menor extremamente congestionadas (*queue link*) apresentem também níveis considerados (exemplo da Rua Santa Luzia). Neste último caso, alguns estudos (Coelho, Farias, e Rouphail, 2005a, 2005b; Coensel et al., 2012) explicam que os veículos que tendem a deslocar-se em marcha lenta ou parados, gastam mais tempo no tráfego emitindo mais

poluentes. Em relação aos controles atmosféricos, os resultados indicam que houve uma influência da frente de brisa e na poluição do ar ao favorecer a condição atmosférica para a dispersão dos poluentes na cidade. Como consequência do aumento da radiação solar e da temperatura durante a passagem da frente da brisa, as simulações decorreram nas classes de estabilidade atmosférica do “moderado” a “levemente instável” que são consideradas potencialmente eficazes no transporte e na dispersão dos poluentes. O conhecimento existente sobre os padrões de vento e os sistemas atmosféricos a eles associados na cidade (Capítulo 1 e Anjos, 2012a) parece sinalizar para cenários atmosféricos favoráveis ao transporte de poluentes. Aracaju, como a maior parte das cidades da costa do nordeste do Brasil, está sob influência constante dos alísios que transportam “ar limpo” do oceano atlântico. Assim, a associação entre os eventos de brisa marítima e vento alísios sinaliza para a condição de *ventilação* sugerida por Papanastasiou e Melas (2009), o que favorece para uma boa capacidade de dispersão e transporte de poluentes na cidade. Para demonstrar o efeito do vento na poluição do ar, observe-se que as maiores concentrações de MP_{10} foram registradas pela simulação da manhã quando a velocidade do vento foi de 2 ms^{-1} comparados com 3.7 ms^{-1} da simulação da noite. O aumento na velocidade do vento dentro do modelo significa uma maior dispersão vertical e turbulência convectiva e, portanto, uma menor permanência da parcela do ar dentro da zona de mistura. Esses resultados revelam que, não só a intensidade do tráfego de automóveis como as condições de ventilação, influenciam o grau de poluição do ar nas vias da cidade.

Em consonância com a velocidade do vento, há que ter em conta a sua direção na aferição dos resultados. Nesse caso, o fluxo ao longo das vias com a orientação Oeste-Leste potencializa a ação do vento no transporte de poluentes melhorando a qualidade do ar, visto que a direção 90° (Leste) é predominante na cidade. Na simulação da manhã, em que a velocidade do vento foi menor, as maiores concentrações de MP_{10} inclinaram-se para as vias com orientações Norte-Sul, o que pode agravar as concentrações de poluentes uma vez que são contrárias ao fluxo de ar dominante.

5.1 Limitações

Apesar do avanço dado na avaliação da qualidade do ar, os resultados deste estudo devem ser tomados com cautela tendo em consideração algumas limitações a seguir apresentadas:

- I. A avaliação das concentrações de poluentes (PTS, fumaça e MP_{10}) monitorados pela estação de qualidade do ar da ADEMA restringiu-se a uma resolução espacial e período de tempo extremamente limitados. A

interpretação dos resultados está limitada a um círculo de influência de 100 metros entorno da estação de recolha que está a 6km da área modelada e, portanto, distante das potenciais fontes de emissão ou dos *hot sports*. Além disso, os dados disponibilizados para este estudo foram semanais e não diários ou horários, o que inviabiliza a validação e a comparação com os dados simulados pelo modelo CAL3QHC. Esse fato evidencia a necessidade de um monitoramento da qualidade do ar mais denso na cidade focando principalmente nas vias potencialmente perigosas do ponto de vista da poluição do ar;

- II. As concentrações de poluentes MP_{10} estimadas pelo modelo CAL3QHC são extremamente sensíveis a alguns parâmetros. O fator de emissão (FE) usado no modelo para os veículos parados e em movimento foram adaptados da literatura especializada, e não da frota local. Do mesmo modo, foram adaptados neste estudo as informações complementares de tráfego como as velocidades dos veículos e a sinalização. Esses fatos indicam a necessidade de endereçar mais estudos para uma descrição sumária das condições de transporte e de trânsito local;
- III. O CAL3QHC usado nas simulações é um modelo que não entra em conta a influência do edificado nas concentrações dos poluentes;
- IV. Este estudo considerou somente as condições do verão 2015 e, portanto, futuros estudos podem fornecer novos elementos para outras situações meteorológicas, que inclua o efeito do sistema brisa marítima e outros poluentes atmosféricos.

6 Conclusão

A avaliação da qualidade do ar em Aracaju realizada neste estudo sinalizou para existência de um problema ambiental ligado à poluição atmosférica considerando as emissões de MP_{10} simuladas pelo software CAL3QHC. As emissões nas vias com alta densidade de tráfego de automóveis notabilizaram-se como uma potencial fonte de poluição do ar intraurbana, posto que foram encontradas concentrações de MP_{10} (máxima $120 \mu g m^{-3}$) que violam as normas nacionais e, portanto, com possíveis efeitos prejudiciais na saúde humana. A partir dos resultados apresentados, evidencia-se a necessidade de um monitoramento da qualidade do ar mais denso na cidade e abre-se um leque de oportunidades de investigações mais sistemáticas sobre a poluição atmosférica intraurbana a fim de subsidiar programas ambientais endereçados à melhoria da qualidade do ar, com vista à diminuição de patologias associadas à poluição atmosférica.

PARTE 3: AVALIAÇÃO CLIMÁTICA PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

Capítulo 6: As Unidades de Resposta Climática Homogêneas (URCH) de Aracaju

1 Introdução

No contexto da avaliação climática para o ordenamento do território, tem-se proposto uma metodologia para a construção dos Mapas Climáticos Urbanos (MCUs) que são uma ferramenta com características espacialmente relevantes para o clima urbano. Os MCUs subdividem-se em dois tipos: o mapa de avaliação ou funções climáticas e mapa das orientações climáticas espacializadas. No primeiro, delimitam-se as áreas com “climas locais especiais” ou com “resposta climática potencial” influenciadas pela morfologia urbana, uso e ocupação do solo e as condições de ventilação, onde se definem as Unidades de Resposta Climática Homogênea (URCH), vulgarmente conhecidos como climatopos. Segundo Alcoforado, (2005, p.42), os climatopos são áreas homogêneas do ponto de vista físico (em termos de morfologia urbana e posição topográfica) que interagem de modo particular com a atmosfera. A cada climatopo corresponderá um clima local próprio, que condicionará de forma diferenciada a vida e as atividades humanas e que exigirá, portanto, medidas específicas para reduzir os impactos negativos além de aproveitar as características positivas do clima urbano.

Em seguida, agrupam-se as URCH medidas/orientações climáticas para o ordenamento do território. As orientações climáticas espacializadas serão alvo de atenção no próximo capítulo.

O mapa das URCH é desenvolvido em ambiente SIG a partir da intersecção de diferentes níveis de informação extraída da geografia local (VDI, 1997; Scherer et., al., 1999; Alcoforado et al., 2009, Ng et al., 2008). Nesse processo de elaboração, os fatores e elementos climáticos têm papéis bem definidos. A base das URCH assenta nos fatores climáticos do uso e ocupação do solo tais como a densidade e geometria dos edifícios, presença de vegetação e corpos d'água, a situação e exposição topográfica e os padrões de ventilação. A combinação particular desses parâmetros força a uma característica climática local similar (Baumüller, 2008) que se pode estender a uma área >1km². O significado das URCH consiste na influência que aqueles fatores climáticos exercem na atmosfera e que se reflete na variação diária da temperatura, umidade relativa do ar e a velocidade do vento. Outras informações

necessárias podem agregam-se a formar uma única e especial URCH, como por exemplo, os níveis de estresse térmico e as emissões de poluentes atmosféricos.

Nessa lógica, a aplicabilidade das URCH depende da função climática em cada área, que deve estar conectada com as diferentes escalas do planejamento. Para Katzschner (2015), o entendimento da noção de escala é muito importante na produção dos MCUs para assegurar qual é a informação correta a ser apresentada ao planejador (Tabela 20).

Tabela 20: Escalas de planejamento e de clima urbano (adaptado de Katzschner, 2015)

| Nível de administração | Nível de planejamento | Análise do clima urbano | Escala climática | Abrangência deste estudo |
|---|---------------------------------------|---|------------------|--------------------------|
| Regional 1:100.000; cidade 1:25.000 | Desenvolvimento urbano; Plano Diretor | Efeitos da ICU, ventilação e corredores de ventilação | Meso-escala | |
| Bairro 1:5.000 | Estruturas urbanas | Conforto térmico; poluição do ar | Local | |
| Vias, quadra de edifícios 1:2.000 | Desenho das vias e espaços abertos | Conforto térmico | Microescala | |
| Edifício individual 1:500 | Desenho do edifício | Efeitos da radiação e ventilação | | |

Observa-se na Tabela 20 que a análise do clima urbano necessita de uma resolução espacial considerando os níveis de planejamento e administração, os quais na visão de Katzschner (2015, p.47-18) se apresentam nos:

- *Planos diretores urbanos* que caracterizam as áreas numa perspectiva de desenvolvimento da cidade. Os aspectos climáticos devem indicar onde estão localizados os corredores de ventilação ou quais os padrões térmicos existentes. As estratégias de ventilação e mitigação do calor devem ser consideradas holisticamente e não podem ser separadas.
- *Planos de Zoneamento ou planos de bairro (estruturas urbanas)* que precisam de especificações mais detalhadas. Aqui, os principais aspectos de planejamento são as condições microclimáticas que podem ser

influenciadas por processos de radiação das superfícies e paredes combinadas com a ventilação a nível do solo.

- *Locais de construção (espaços abertos e edifícios)* onde se analisam a densidade do edificado, os *canyons* urbanos, a vegetação e os espaços abertos da cidade ao nível da microescala. Muitos deles podem ter um impacto isolado.

1.1 Experiências e lições de casos de estudo

O volume editado em 2015 por Ng e Ren “*The Urban Climatic Map: a methodology for sustainable urban planning*” representa, desde então, a principal publicação sobre o estado da arte na criação e aplicação dos MCUs. Essa obra mostra que muitas cidades do mundo e de diferentes tamanhos, já formularam seus MCUs e muitas outras estão a fazê-los extensivamente (Figura 44). Não se pretende aqui, fazer uma extensiva revisão sobre a temática já abordada em profundidade em outros estudos (Ren, 2015), mas tão-somente apresentar as experiências que influenciaram na construção das URCH de Aracaju.



Figura 44: Mapas climáticos urbanos no mundo (Ren, 2015).

Na Alemanha, em 1993, foi disponibilizada uma metodologia pelo Comitê Nacional de Climatologia Urbana Aplicada o VDI 3787: Part 1, chamado de “*Environmental Meteorology – Climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions*” que viria a ser referência internacional na temática dos MCUs. A metodologia leva em consideração fatores analíticos e fatores de avaliação climáticos e biometeorológicos do clima local e da qualidade do ar com vista ao planejamento urbano e regional (VDI3738 Part1). O estudo dos MCUs iniciou enfatizando o potencial dinâmico e a informação do vento

nomeadamente os corredores de ar, incluindo a emissão de poluentes a partir do tráfego veicular com objetivo de melhorar o ambiente urbano. Muitas cidades alemãs destacam-se na construção dos MCUs como Stuttgart (Baumueller et al., 1992; Baumueller et al., 2008)¹² (Figura 45), Kassel (Katzschner, 1993), Munique (Matzarakis e Mayer, 1992), Berlim (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2001)¹³, e a região metropolitana do Ruhr (Stock et al., 1991). Entre outros, destacam-se os MCUs desenvolvidos na Suíça (Lindqvist e Mattsson, 1989; Scherer et al., 1999) e Áustria (Lazar e Podesser, 1999). Recentemente, foi lançada na região do Basel uma nova definição de climatopos (entre Suíça, Alemanha e França) baseando-se nos fatores climáticos do terreno e uso do solo e que não faz uso dos elementos climáticos como a temperatura e a velocidade do vento (Fehrenbach et al., 2001, Parlow et al., 2001).

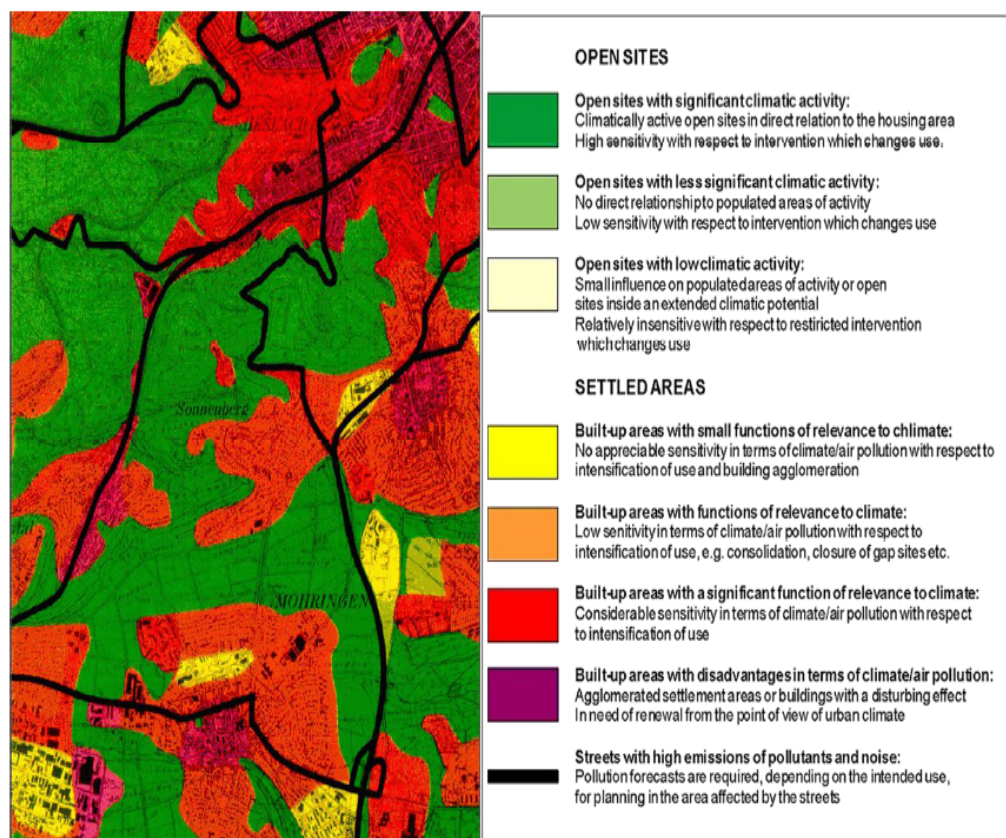


Figura 45: Exemplo de Mapa Climático Urbano na cidade de Stuttgart (KlimaAtlas, 1992)

¹² http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?climate_climate_atlas_1992_9

¹³ http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/edua_index.shtm

Em Hong Kong, os MCUs têm grande importância nas decisões políticas relativas ao planeamento da cidade. A construção dos MCUs debruça-se no entendimento do efeito térmico urbano, potencial dinâmico e informação do vento (Ng et. al., 2008). Em linhas gerais, o procedimento na construção dos MCUs em Hong Kong tem sido baseado na ponderação do sentido positivo ou negativo sobre o conforto térmico (usando a Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) como referência), atribuída às variáveis consideradas. Os MCUs destinam-se a identificar as áreas geográficas críticas em termos de estresse térmico e propõem uma série de medidas baseada na avaliação da ventilação urbana para mitigar os efeitos negativos do estresse térmico (Ng et. al., 2009a) (Figura 46).

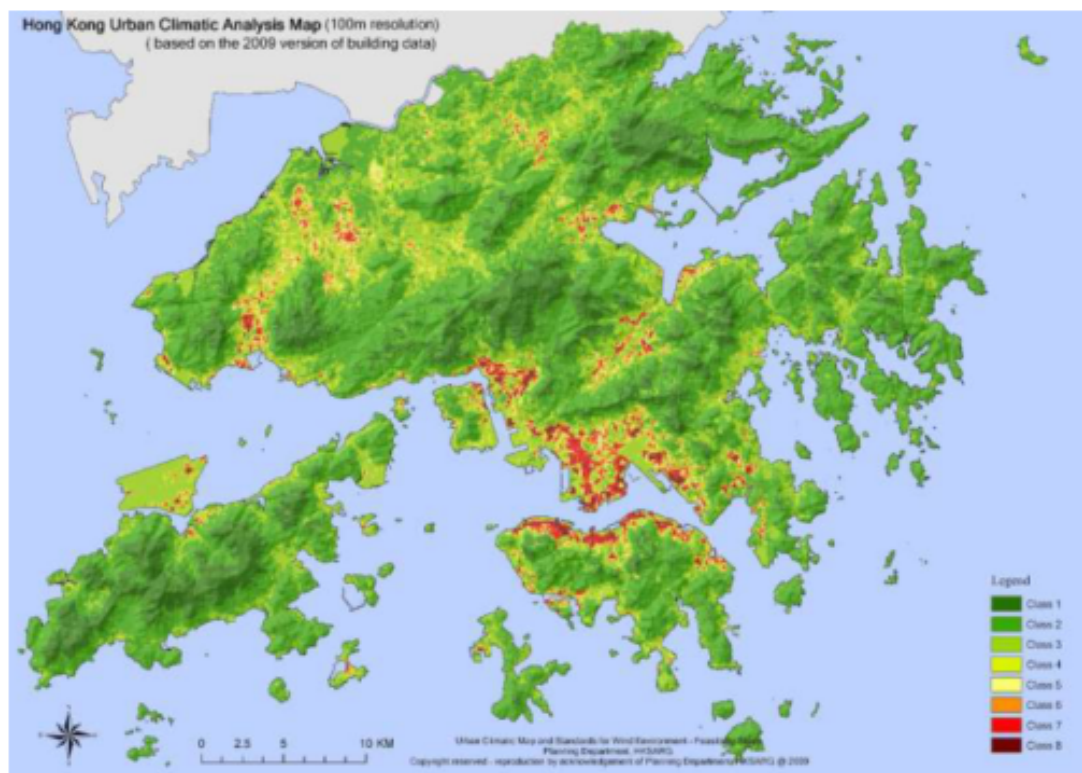


Figura 46: MCU de Hong Kong (Ng et al., 2008)

Em Portugal, têm sido gerados vários MCUs em diversas cidades a citar o notório de Lisboa (Alcoforado et al., 2005, 2009), Funchal\Ilha da Madeira (Lopes, 2015), Cascais (Lopes e Correia, 2012) e Figueira da Foz (Marques, 2011). O procedimento de construção do mapa das URCH são baseados no cruzamento de dois fatores climáticos: morfologia urbana e classes de ventilação. A morfologia urbana concentra-se na densificação da malha urbana com o consequente aumento do efeito térmico/ICU e a redução da velocidade do vento. Vários parâmetros de densidades são definidos: (i) H/W – razão entre as

alturas dos edifícios (H) e largura das ruas (W); (ii) rugosidade aerodinâmica (z_0) – que representa o atrito ao vento provocado pela rugosidade das superfícies na camada limite atmosférica (CLA) (iii) Índice de Volumetria (IV) – total massa “edificada” (volume edificado) em cada célula de 100x100m, definida pela altura média dos edifícios na camada atmosférica urbana inferior em relação a uma malha regular normalmente 100 x 100 metros. O termo densidade urbana é importante nesse contexto, pois além de ter em conta a medida da altura e extensão da cobertura do edificado, isto é a volumetria do edificado, considera a medida dos espaços vazios onde se dá a acumulação e as trocas de calor. Dentro da morfologia urbana, os espaços verdes distinguem-se, sobretudo, pela sua maior ou menor permeabilidade, capacidade de redução do vento junto à superfície, redução da temperatura através da evapotranspiração (função de arrefecimento dos espaços) e sombreamento (redução da radiação solar direta).

A partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) são delimitadas as “unidades de relevo” que correspondem às áreas com características topográficas relativamente semelhantes. A partir da informação topográfica são definidas as classes (ou padrões) de ventilação obtidas de acordo com as formas de relevo, que orientam as direções predominantes do fluxo e a drenagem do ar. Assim, as classes de ventilação refletem as áreas com funções específicas que atuam nos campos térmicos urbanos e na qualidade do ar.

Em Lisboa (Alcoforado et al., 2005; 2009), a partir dos climatopos foram enumeradas várias orientações climáticas para o ordenamento das áreas em expansão urbana e nas áreas já “consolidadas” da cidade, de modo a garantir as condições climáticas aceitáveis e evitar as situações indesejáveis. Destacam-se também a inclusão de espaços verdes e a permanência dos corredores de ventilação junto ao litoral para facilitar a circulação do vento regional, das brisas do estuário e marítima, contribuindo estas para mitigar a ICU, promover a ventilação e melhorar a qualidade do ar na cidade (Figura 47 (a)). No município de Cascais (Lopes e Correia, 2012), o projeto Avaliação do Potencial Eólico, Qualidade do Ambiente Urbano e Turismo na Região de Cascais - PEQAUT¹⁴ foram elaboradas as URCH para avaliar as condições climáticas locais no que concerne à ventilação e aos padrões térmicos. Agregasse às URCH, a componente sobre a avaliação do potencial eólico em áreas periurbanas com o objetivo de possibilitar a instalação de miniturbinas para geração de eletricidade e abastecimento das comunidades locais (Figura 47 (b)). Uma rede meteorológica de mesoescala foi instalada na cidade para

¹⁴ <http://projecto-cascais-igot.weebly.com/unidades-morfo-climaacuteticas-climatopos.html>

avaliar os padrões térmicos e ajudar na avaliação e validação das URCH. Baseando-se na metodologia supracitada, foram propostas URCH no Funchal\Ilha da Madeira (Lopes, 2015): componentes como a suscetibilidade à ocorrência de aluviões (designação local de correntes torrenciais nas vertentes devido à forte precipitação) e a poluição do ar com origem no tráfego de veículos (Figura 47 (c)). Na cidade costeira de Figueira da Foz (Marques, 2011), as URCH foram construídas por meio do cruzamento de parâmetros climáticos referentes ao efeito térmico e à ventilação potencial a fim de avaliar a situação do conforto térmico (Figura 47 (d)).

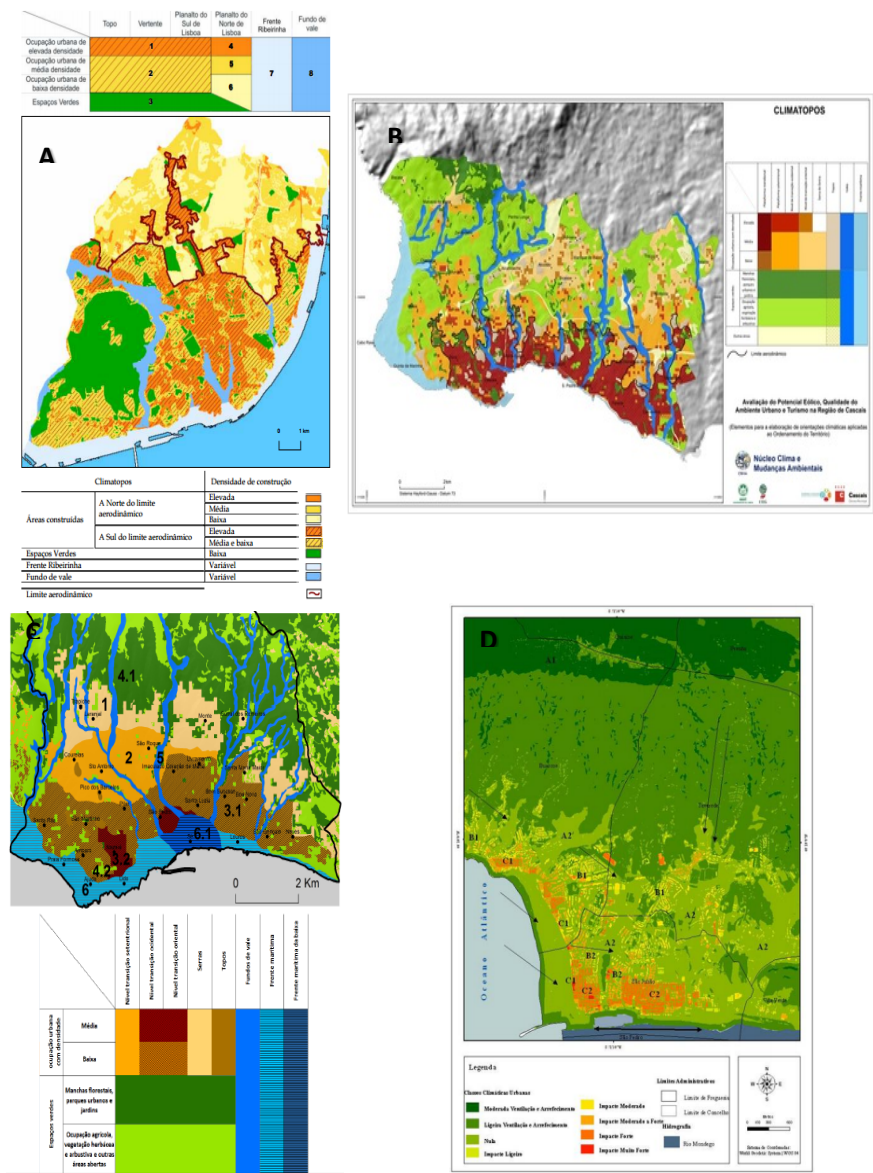


Figura 47: Exemplos de mapas climáticos urbanos nas cidades portuguesas de Lisboa (A), Cascais (B), Funchal\Ilha da Madeira (C) e Figueira da Foz (D).

No Brasil, a temática envolvendo o uso e aplicabilidade dos MCUs começa a ganhar corpo, ainda que timidamente. A primeira experiência dos MCUs no país vem da cidade de Salvador-BA motivada pelo longo conhecimento das características do clima urbano, nomeadamente os padrões térmicos (ICU) associados ao uso e padrões de ocupação do solo (Andrade et al., 2015). O MCU de Salvador representou uma análise téorica-qualitativa das potenciais condições do conforto térmico (tendo como referência o índice PET) baseando na ponderação das informações conforme os seus efeitos no armazenamento do calor e no potencial de ventilação (Figura 49). Posteriormente, o MCU serviu de suporte para a realização de estudos microclimáticos.

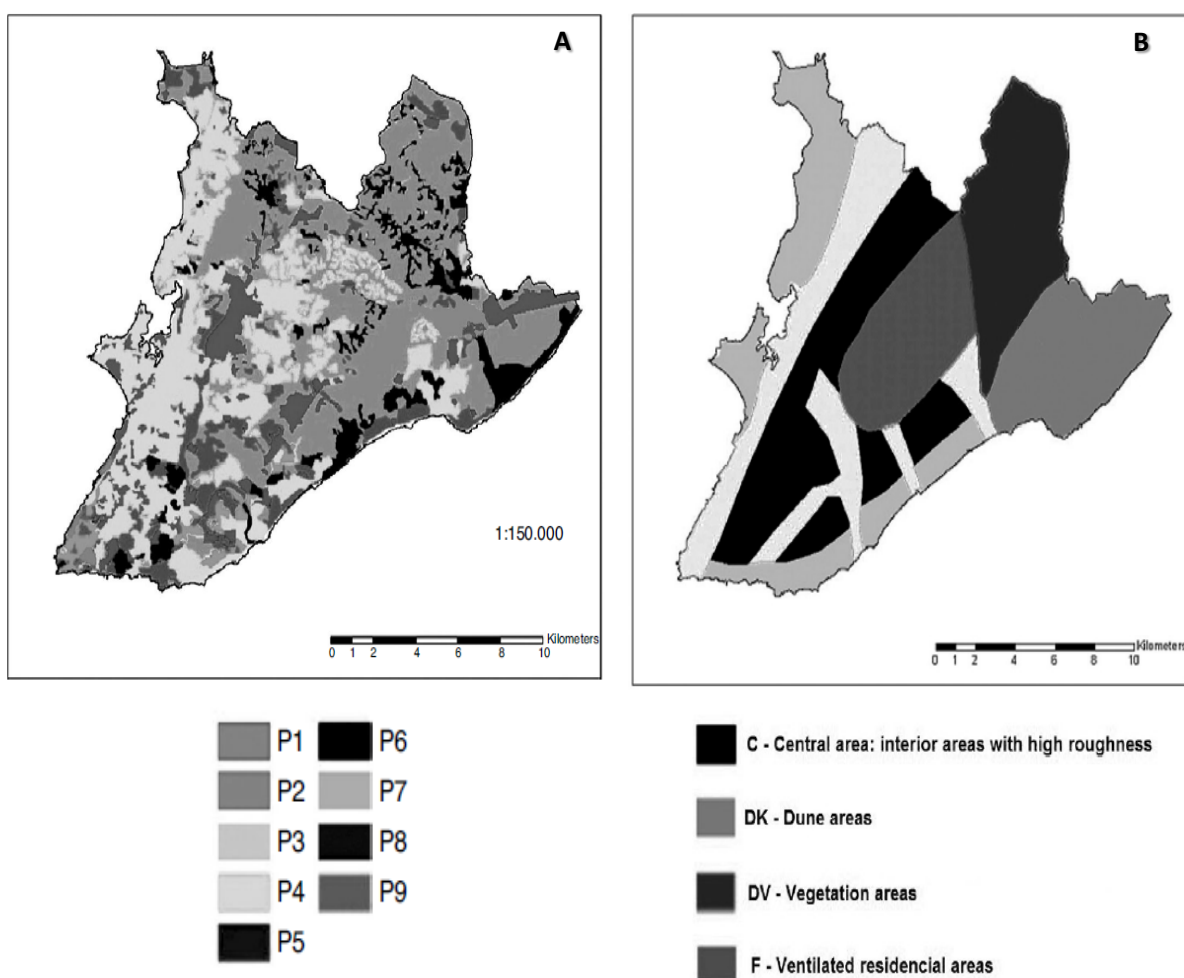


Figura 48: MCUs de Salvador baseando nas classes do uso do solo (A) e ventilação (B). Adaptado de Andrade et al., (2015).

Em Macéio-AL, Melo (2009) procedeu à elaboração do MCU da cidade através da avaliação do efeito térmico e da dinâmica dos ventos. O mapa classificou as áreas com características climáticas específicas onde se identificaram áreas que devem ser preservadas, protegidas e melhoradas

climaticamente. Em seguida, o MCU foi comparado com o macrozoneamento proposto pelo Plano Diretor e o macrozoneamento previsto pelo Código de Edificações de Macéio a fim de subsidiar ações de planejamento urbano (Figura 50).

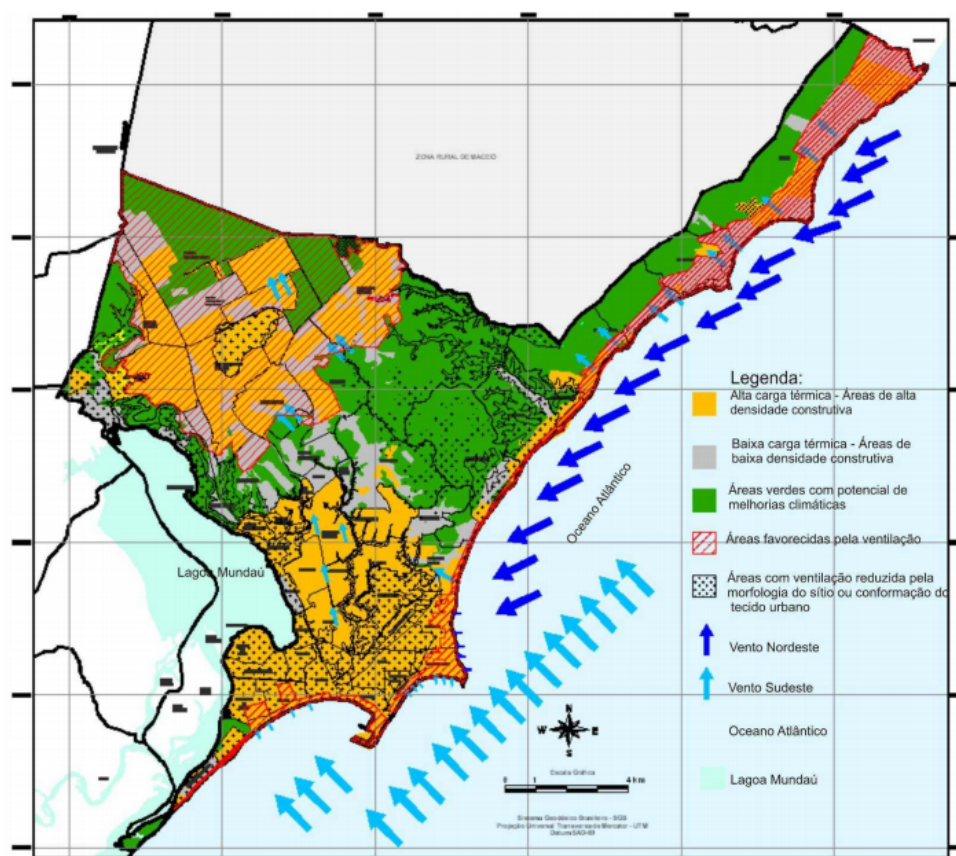


Figura 49: Mapa Climático de Maceió –AL. Adaptado de Melo (2009).

Em João Pessoa - PB, para a construção do MCU Ribeiro (2013) considerou as variáveis do balanço térmico determinada pelo efeito térmico e potencial dinâmico de ventilação. No mapa foram representadas oito classes onde se identificaram áreas que devem ser preservadas, protegidas ou melhoradas climaticamente. Em seguida, o autor comparou o zoneamento climático baseado no MCU com o macrozoneamento previsto pelo Plano Diretor da cidade referente ao uso e ocupação do solo (Figura 51).

Em Recife, Barros e Lombardo (2013) classificaram a paisagem urbana em zonas climáticas com vistas ao planejamento levando em conta três etapas: (i) a temperatura de superfície, (ii) a definição das unidades e ocupação urbanas (vegetação, hidrografia, relevo, ocupação do solo e morfologia urbana) e, com base na sobreposição dessas informações em ambiente SIG, (iii) foram definidas três grandes zonas climáticas e suas subzonas (Figura 51).

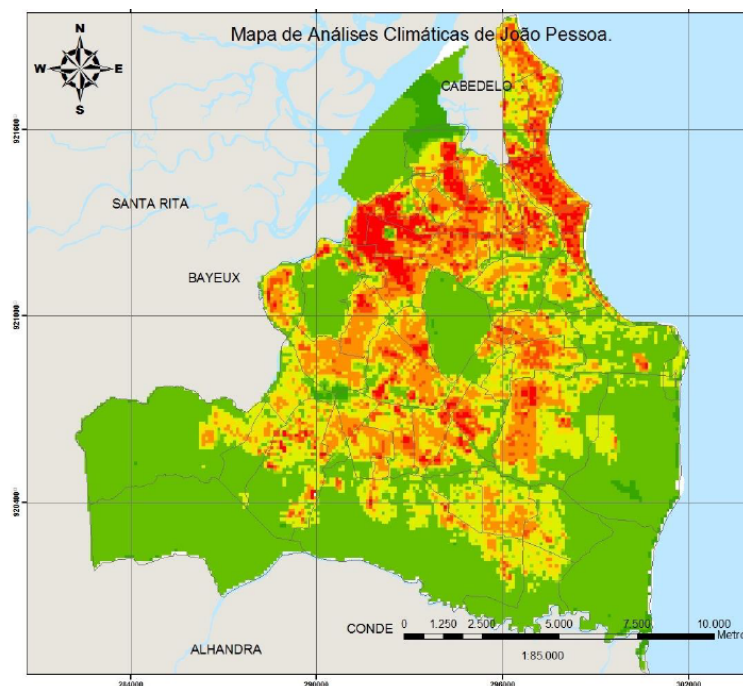


Figura 50: Mapa de Análises Climáticas de João Pessoa – PB. Adaptado de Ribeiro (2013).

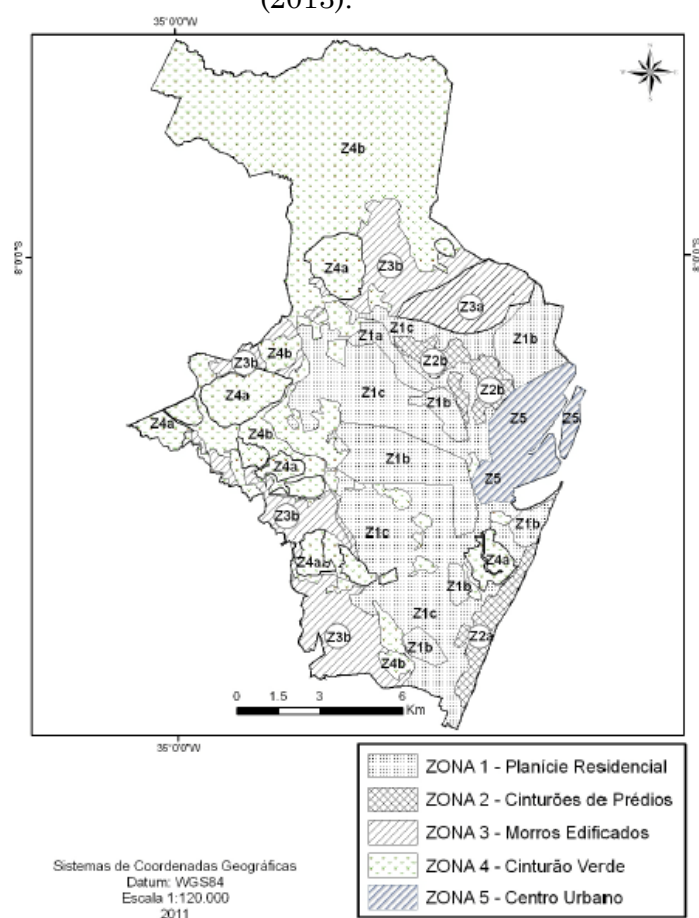


Figura 51: Zoneamento climático urbano em Recife. Adaptado de Barros e Lombardo (2013).

A mais recente produção dos MCUs em contexto brasileiro vem de Campinas-SP (Shimomura et al., 2015). As URCH foram geradas a partir do cruzamento da ventilação urbana com as variáveis uso do solo, rugosidade aerodinâmica e topografia. Campos de ventos foram gerados com o software WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*); o parâmetro rugosidade aerodinâmica foi atribuído a partir das diferenças de ocupação do solo obtidas através de uma imagem Landsat7, levando em consideração as macro-zonas estabelecidas no plano diretor da cidade. Segundo Shimomura et al., (2015) as URCH de Campinas reforçam a importância da componente ventilação urbana na construção dos MCUs especialmente nas regiões tropicais de clima quente. Com base no MCUS foram sugeridas medidas e recomendações para o planejamento urbano com vistas a melhoria do conforto térmico e qualidade do ar (Figura 53).

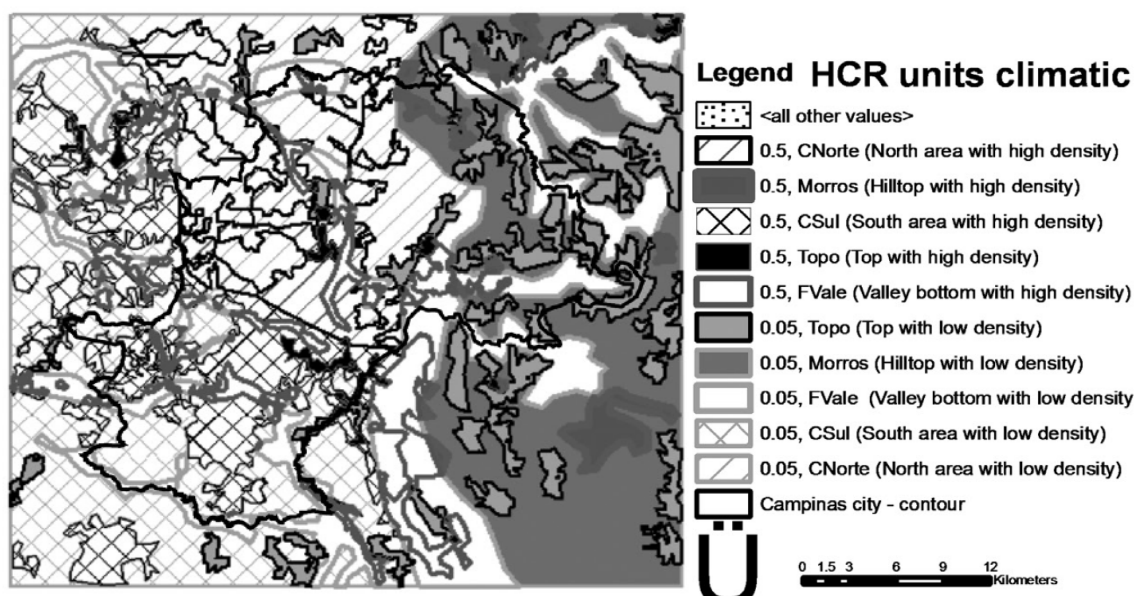


Figura 52: URCH de Campinas adaptado de Shimomura et al., (2015).

Em todas essas experiências apresentadas, entende-se que:

- Os MCUs respondem às características do clima local e identificam as áreas onde o planejamento específico e os desdobramentos regulatórios no uso e ocupação do solo são necessários para preservar ou evitar os efeitos climáticos adversos;
- Os MCUs têm como objetivo dar informações para melhorar a qualidade do ambiente urbano e, portanto, consituem um elemento que pode contribuir para a habitabilidade urbana;
- A natureza dos MCUs é uma compilação de conhecimentos do clima urbano numa visão holística, o que permite inferir um grau sinérgico

entre as variáveis, como se notou na agregação de novas informações no quadro da metodologia;

- A construção dos MCUs passa pela interseção (em ambiente SIG) de diferentes níveis de informação sobre a morfologia urbana (uso e ocupação do solo), classes de relevo e ventilação que traduzem as diferenças territoriais em função da resposta climática única advinda desse cruzamento;
- A precisão do MCU depende fortemente da qualidade do banco de dados relativos aos fatores climáticos, de modo que, cada um é ponderado conforme a sua influência nos elementos climáticos considerados na análise;
- Os MCUs orientam a realização de estudos microclimáticos específicos;
- Os MCUs devem estar em sintonia com as escalas de interesse dos órgãos de planejamento bem como incorporados na ótica do macrozoneamento estabelecido pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano – PDDU;
- A aplicabilidade dos MCUs passa necessariamente pelo julgamento dos técnicos municipais e demais atores envolvidos no planejamento que avaliarão as medidas propostas e, portanto, um trabalho colaborativo entre cientistas e técnicos operacionais.

2 Materiais e métodos

As experiências de Lisboa levadas a cabo por Alcoforado et al., (2005), Cascais por Lopes e Correia (2012) e Hong kong por Ng, et. al., (2008) orientaram a construção das URCH em Aracaju. O procedimento metodológico assenta numa base cartográfica com diferentes níveis de informações (camada) “interseccionadas” dentro do ambiente SIG (Figura 53). O mapa das URCH de Aracaju foi gerado no âmbito do conhecimento das características do clima urbano, a partir do cruzamento da camada *morfologia urbana* e *classes de ventilação*. A base cartográfica consiste na elaboração dos mapas do fator de visão do céu (camada 1) e espaços verdes (camada 2) referente à camada *morfologia urbana* e na elaboração dos mapas de rugosidade aerodinâmica (camada 4) e corredores de ventilação (camada 5) referente à camada *classes de ventilação* (Figura 53). Às URCH, agregaram-se a camada *Local Climate Zones* e as informações adicionais sobre o conforto térmico, poluição do ar e a frente de brisa marítima com objetivo de dar maior consistência ao sistema de

avaliação climática. As razões que levaram a seleção dessas camadas serão justificadas nas secções seguintes.

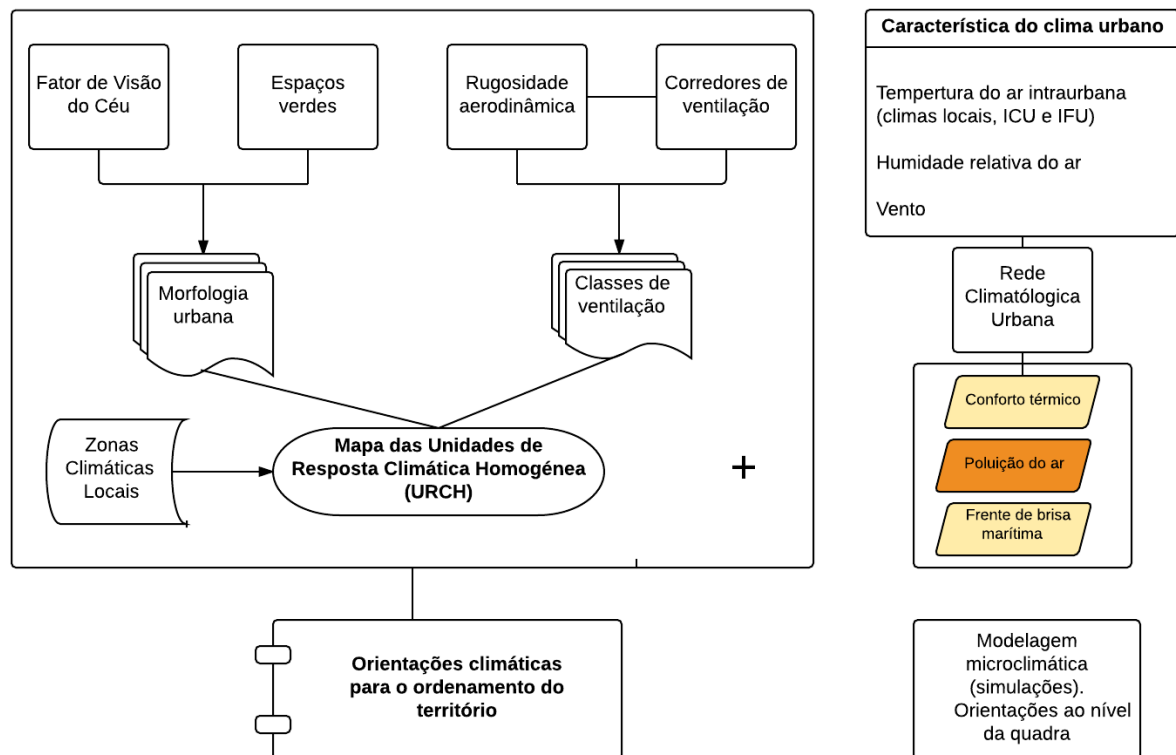


Figura 53: Metodologia para a construção das URCH de Aracaju.

3 Mapa da morfologia urbana

3.1 Cartografia do Fator de Visão do Céu (camada 1)

Designado por ψ_{sky} , o Fator de Visão do Céu (FVC) (*Sky View Fator* em inglês) é definido como a proporção de céu visível a partir de um determinado ponto da superfície variando entre 0 a 1. Os valores próximos de 0 indicam obscuridade, dificultando a saída de radiação e valores próximos de 1 indicam que a entrada e saída de radiação é facilitada para o espaço livre (Oke, 1988). Em grande medida, a geometria urbana geralmente representada pelo FVC é responsável pelas diferenças de temperatura intraurbanas (Oke, 1999; Chen et al. 2012; Gál e Unger 2014,). Teoricamente, o FVC é considerado um dos mais importantes agentes do fenômeno da Ilha de Calor Urbano (ICU) (Unger, 2009) e o mais adequado indicador para descrever a densidade de edifícios em relação à variação da temperatura para um complexo ambiente urbano no mundo real (Chen e Ng, 2011). É, portanto, um excelente indicador da morfologia urbana.

3.1.1 Dados de entrada e operação no ambiente SIG

- Arquivo vetor (.shp) com a forma e altura (m) dos edifícios;
- Arquivo vetor (.shp) com altura da copa das árvores;
- Arquivo vetor de pontos (.shp) onde será calculado o FVC.

Para estimar o FVC em Aracaju, foi usado o software *SVF mapping tool* desenvolvido por Gál e Unger (2014) em linguagem Java, compatível com plataforma Windows e que não precisa de nenhum software GIS para operar. A sua vantagem é que engloba no seu cálculo o FVC a partir das copas das árvores. O cálculo do FVC leva em conta os efeitos de diferentes tipos de objetos, tais como edifício (B) com o maior ângulo de elevação (β) numa dada direção a partir de um ponto de referência, árvore (T_1) com o maior ângulo de elevação ($\beta + \gamma$) na mesma direção; árvore (T_2) com o maior ângulo zênital (δ) da árvore ou de árvores próximas. Esses ângulos juntam-se a um dado ponto onde o cálculo do FVC é realizado (Figura 54).

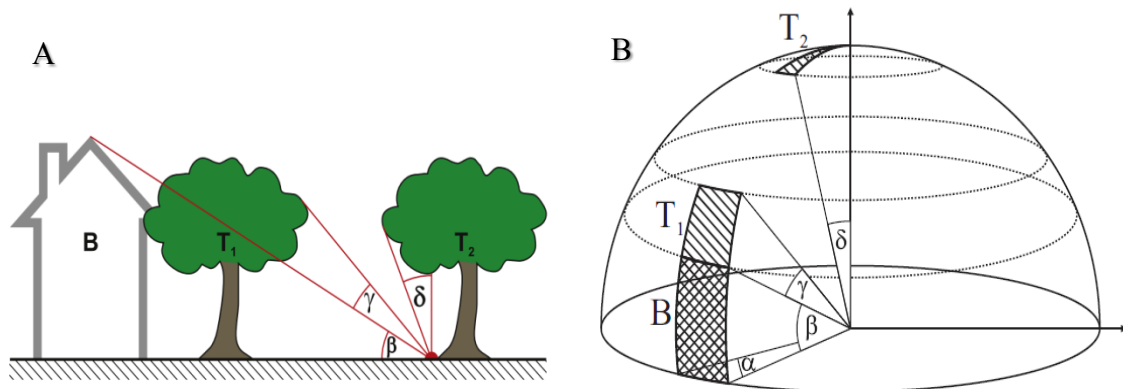


Figura 54: (A) elevação de ângulos para diferentes objetos (edifício e árvore) numa dada direção e (B) polígonos no hemisfério correspondentes a um edifício e aos dois tipos de cobertura de árvores (T_1 e T_2) (Gál e Unger, 2014).

O valor do FVC para um dado ponto pode ser obtido a partir da seguinte equação (Gál e Unger, 2014):

$$SVF = 1 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \sin^2 \beta_i + \sum_{i=1}^n \tau \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \left(\sin^2 (\beta_i + \gamma_i) - \sin^2 \beta_i \right) + \sum_{i=1}^n \tau \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \left(1 - \sin^2 (90^\circ - \delta_i) \right) \right) \quad (11)$$

onde α é o ângulo de rotação que define a resolução do cálculo, n é o número de divisões do círculo considerando um hemisfério ($n=360/x$) (Figura 54 (b)). Determina-se o cálculo do FVC usando somente os ângulos de elevação (β , γ , δ) dos polígonos dos edifícios e das árvores (B, T_1 , T_2).

A base de dados 3D de edifícios e árvores usada no modelo simplifica a realidade em termos de superfície urbana, edifícios projetados em forma de retângulos espaçados entre si, formando vias e espaços de diferentes dimensões com ou sem presença da vegetação. A qualidade da base de dados 3D determina a precisão do algoritmo no cálculo do FVC. No cálculo do FVC de Aracaju foram usados um total de 95.772 polígonos e 38.000 pontos (*random points*) distribuídos ao longo das vias e espaços abertos usando a função *fishnet* ARCGIS. Foram usados o α de 1° e o raio de procura de 100 metros (Unger, 2009), pois coincidem com a maioria da dimensão das quadras de edifícios na cidade e com a resolução escalar adotada na construção das UCRH (100m x 100m). O valor do FVC é dado em cada ponto, de modo que, a quantidade de pontos determina a resolução do mapa final.

Como o software *SVF mapping tool* tem a limitação no tamanho da área e no número de pontos, optou-se por dividir toda área de Aracaju em 28 secções (Figura 55). A saída do software é um arquivo vetor de pontos com valores de FVC associados a uma tabela de atributos que, ao importá-la dentro do ARCGIS, permitiu (i) juntar todos os 28 polígonos com a função “*merge*”, (ii) sumarizar estatisticamente os valores de FVC e (iii) gerar um mapa arquivo *grid* com valores contínuos de FVC.

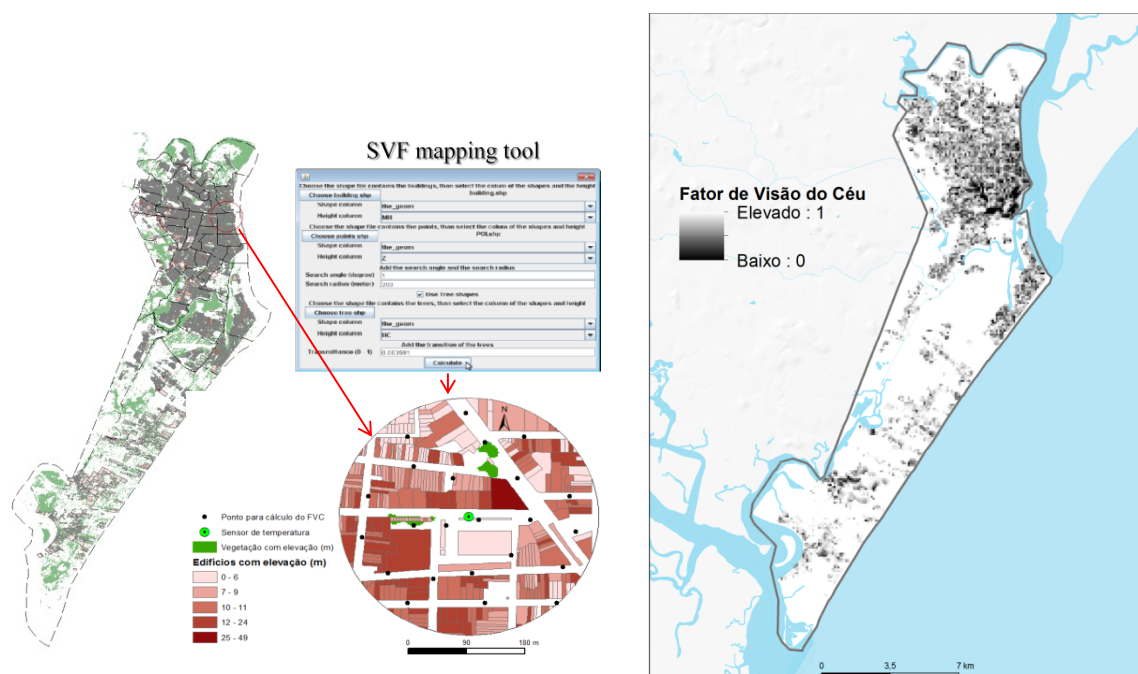


Figura 55: Construção do mapa do FVC em Aracaju.

3.1.2 Validação do FVC

A precisão do mapa FVC foi avaliada no contexto das UCRH. Para isso, um breve estudo empírico foi desenvolvido baseando-se na influência do FVC na variação da temperatura, representada pelas anomalias relativas de temperatura. Normalmente, o efeito da ICU é entendido como uma anomalia de temperatura positiva que ocorre na área urbana em relação às áreas circundantes. Uma anomalia é a diferença na temperatura em relação a um valor referência (temperatura média) num determinado período de referência (*baseline*). Quando a diferença é positiva, isto é, anomalia positiva indica que a temperatura medida foi *mais elevada* que o valor de referência, enquanto a anomalia negativa indica que a temperatura medida foi *mais baixa* que o valor de referência. Por assim, as diferenças de temperatura intraurbanas são aparentemente mais bem representadas pelas anomalias de temperatura relativa do que as temperaturas absolutas uma vez que as anomalias têm maior correlação espacial e menor variação e estimativa de incerteza em torno da média de temperatura. As anomalias relativas de temperatura têm sido utilizadas noutros estudos para analisar a ICU (Alexander e Mills, 2014); as diferenças espaciais de temperatura e sua relação com o uso do solo (Eliasson e Svensson, 2003) incluindo as diferenças de temperatura entre o parque urbano e a área construída envolvente (Upmanis e Chen, 1999).

Neste estudo, as anomalias relativas de temperatura foram utilizadas para representar as diferenças de temperatura intraurbana influenciadas pelo FVC. Desso modo, foram criadas séries de anomalias relativas de temperatura para as setes ($n=7$) estações urbanas (s) da Rede Climatológica Urbana (RCU). Através do valor médio horário $\bar{T}_{s(h)}$ (00:00h-23:00h), calculou-se a anomalia térmica relativa $T'_{s,t(h)}$ para cada estação urbana como a diferença entre a média horária da estação urbana e a média horária do grupo das demais estações urbanas no período de referência (t) de 2014-2016, conforme:

$$T'_{s,t(h)} = \bar{T}_{s(h)} - \sum_{i=1}^{n=7} \bar{T}_{s(h)} \quad (12)$$

Em sequência, definiu-se um círculo de influência de 100 metros em torno de cada estação urbana onde se extraíram os valores médios das anomalias relativas de temperatura e dos FVCs. A força de correlação entre o FVC e a anomalia relativa de temperatura intraurbana foi analisada através da regressão linear simples.

A influência da geometria urbana, quantificada pelo FVC, na variação diária da anomalia relativa de temperatura pode ser verificada através da Figura 56 e Tabela 21. Como se esperava, os resultados atestaram os menores FVCs para as estações urbanas representativas das áreas centrais da cidade, tendo Jardins registrado o menor valor médio FVC com 0.557, seguido pelo Centro da Cidade com 0.697, exceto para Siqueira Campos com 0.825. Enquanto a área periurbana da cidade (Santa Maria, Zona de Expansão e Praia José Sarney) apresentaram os maiores SVFs próximos de 0.94. Parque da Cidade (a norte) apresentou o FVC médio de 0.603 atribuído à vegetação densa.

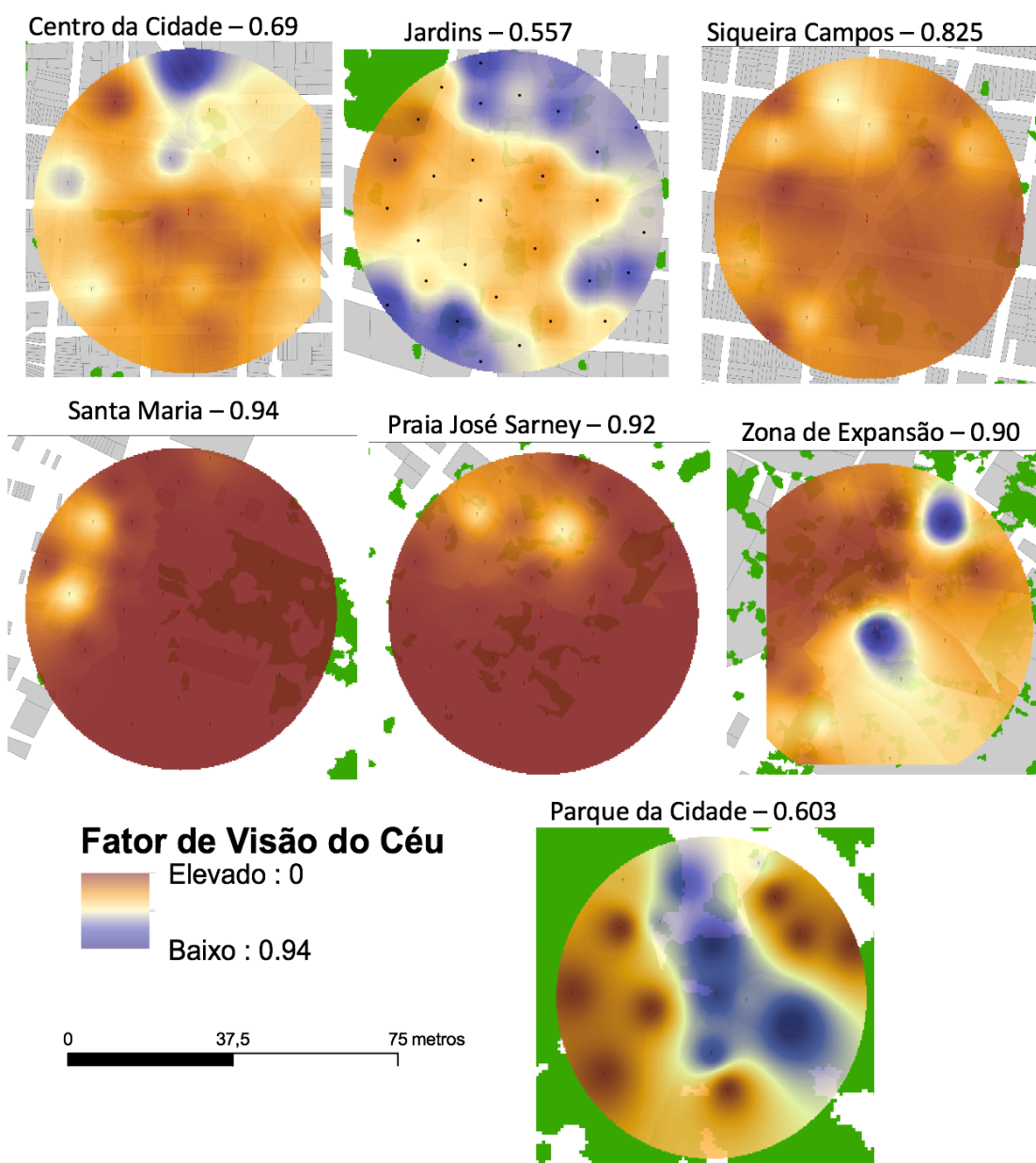


Figura 56: Valores contínuos de FVC de sete estações urbanas a partir de um círculo de influência de 100 metros.

Na Tabela 21 é apresentada a variação diária das anomalias relativas de temperatura para cada estação urbana no conjunto total das observações. Foi verificado uma tendência perceptível de anomalias positivas nas estações das áreas centrais, variando próximos de 1°C ao longo do dia, ao passo que, nas estações das áreas periurbanas tenderam para anomalias nulas e negativas ao redor de -0.3°C. Neste ponto, Parque da cidade apresentou as maiores anomalias negativas durante todo o dia chegando a -1.6°C às 09:00h. A correlação entre FVC e anomalia relativa de temperatura analisada também mostrou uma razoável concordância, ao indicar que menores os FVCs levam a anomalias positivas e os maiores FVCs levam a anomalias negativas.

Tabela 21: Correlação linear entre a anomalia relativa horária de temperatura e FVC no período de 2014-2016.

| Hora | Anomalia relativa da temperatura do ar (°C)* | | | | | | | R ² | α (%) |
|------|--|-----|-----|------|------|------|------|----------------|-------|
| | SCA | CC | JAR | PC | STM | PJS | ZE | | |
| 0 | 0,0 | 0,9 | 0,9 | -1,4 | -0,3 | 0,2 | -0,2 | 0,391 | 5 |
| 1 | 0,0 | 0,8 | 0,9 | -1,5 | -0,3 | 0,2 | -0,1 | 0,384 | |
| 2 | -0,1 | 0,8 | 0,9 | -1,5 | -0,3 | 0,3 | -0,1 | 0,375 | |
| 3 | -0,2 | 0,8 | 0,9 | -1,5 | -0,3 | 0,3 | -0,1 | 0,344 | |
| 4 | -0,3 | 0,7 | 0,9 | -1,5 | -0,2 | 0,4 | -0,1 | 0,324 | |
| 5 | -0,3 | 0,7 | 0,9 | -1,5 | -0,3 | 0,5 | 0,0 | 0,325 | |
| 6 | -0,4 | 0,7 | 0,9 | -1,5 | -0,3 | 0,5 | 0,0 | 0,300 | |
| 7 | -0,5 | 0,7 | 0,9 | -1,4 | -0,3 | 0,6 | 0,0 | 0,290 | |
| 8 | -0,5 | 0,8 | 1,0 | -1,4 | -0,3 | 0,5 | -0,1 | 0,337 | |
| 9 | -0,1 | 1,0 | 1,0 | -1,6 | -0,2 | 0,2 | -0,3 | 0,360 | |
| 10 | 0,1 | 0,8 | 0,8 | -1,4 | 0,2 | -0,3 | -0,3 | 0,330 | |
| 11 | 0,2 | 0,7 | 0,8 | -1,0 | 0,3 | -0,6 | -0,3 | 0,423 | |
| 12 | 0,2 | 0,7 | 0,9 | -0,7 | 0,2 | -0,9 | -0,4 | 0,545 | |
| 13 | 0,2 | 0,6 | 1,0 | -0,4 | 0,2 | -1,1 | -0,4 | 0,558 | |
| 14 | 0,2 | 0,6 | 1,0 | -0,4 | 0,1 | -1,2 | -0,4 | 0,571 | |
| 15 | 0,2 | 0,6 | 1,0 | -0,5 | 0,1 | -1,1 | -0,4 | 0,578 | |
| 16 | 0,2 | 0,6 | 1,1 | -0,7 | 0,1 | -1,0 | -0,3 | 0,616 | |
| 17 | 0,2 | 0,7 | 1,1 | -1,0 | 0,1 | -0,9 | -0,2 | 0,592 | |
| 18 | 0,2 | 0,8 | 0,9 | -1,2 | 0,1 | -0,7 | 0,0 | 0,527 | |
| 19 | 0,2 | 0,9 | 0,8 | -1,5 | 0,0 | -0,5 | 0,0 | 0,457 | |
| 20 | 0,2 | 1,0 | 0,9 | -1,6 | -0,1 | -0,2 | -0,1 | 0,423 | |
| 21 | 0,1 | 1,0 | 0,9 | -1,5 | -0,2 | -0,1 | -0,3 | 0,430 | |
| 22 | 0,1 | 0,9 | 0,9 | -1,5 | -0,2 | 0,0 | -0,2 | 0,416 | |
| 23 | 0,0 | 0,9 | 0,9 | -1,5 | -0,3 | 0,1 | -0,2 | 0,406 | |

*SCA – Siqueira Campos, CC – Centro da Cidade, JAR – Jardins, PC – Parque da Cidade, STM – Santa Maria, PJS – Praia José Sarney, ZE – Zona de Expansão.

Ao analisar a correlação estatística na tabela 22, observou-se o aumento significativo da correlação entre anomalias relativas de temperatura e FVC durante o período da tarde (entre 12:00h às 18:00h), com o maior coeficiente de determinação de 0.616 ocorrendo às 16:00h. A esta hora, uma regressão linear simples foi realizada na qual mostrou uma forte correlação “negativa” entre o FVC e as anomalias relativas de temperatura (Figura 57). Assim, os resultados deste estudo empírico revelam que o FVC tem influência na variação de temperatura intraurbana local e, portanto, confirma-se como um indicativo considerável no que se refere a avaliação da morfologia urbana.

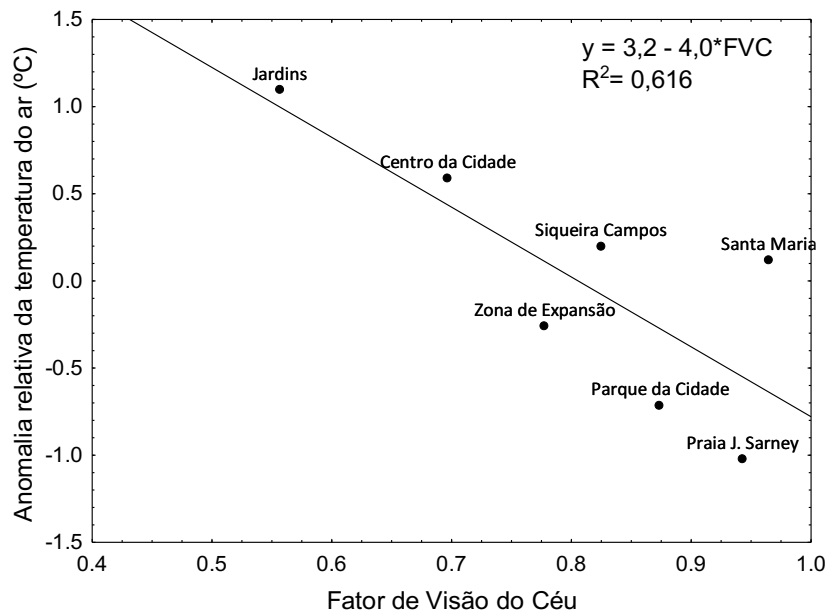


Figura 57: Correlação linear entre FVC e anomalia relativa de temperatura às 16:00h referente ao período 2014-2016.

3.1.3 Mapeamento do FVC

O mapa do FVC foi classificado, de maneira que, o menor valor de FVC (alto) indica um aumento na temperatura. Para determinar o valor do FVC como uma camada do UCRH, usou-se uma função da regressão calibrada com 5% de nível de significância referente à hora com o maior coeficiente de correlação mostrado na Figura 57. Desse modo, às 16:00h, foi gerada a seguinte equação:

$$\Delta T_{\text{anomalia}} = 3,2286 - 4,0078 \times \text{FVC}, \quad (13)$$

$$R^2 = 0.616 \quad (0.5 < \text{FVC} < 0.96)$$

onde o coeficiente de regressão de -4.0078 indica que o FVC é inversamente proporcional às diferenças diárias de anomalias relativas de temperatura, traduzindo-se termicamente da seguinte forma: uma diminuição de ~ 0.5 no

FVC (FVC menor) poderá produzir uma diferença de anomalia térmica positiva próxima de 1.2°C no período de maior aquecimento diurno (às 15-16:00h). No contexto da URCH, é razoável supor que o valor de 0.5 FVC pode corresponder a um efeito positivo de 1°C na temperatura, desde que não leve em conta o efeito das áreas sombreadas pelos edifícios. Baseado nessa relação, o mapa de FVC e as classes indicando o seu efeito térmico podem ser vistos na Figura 58.

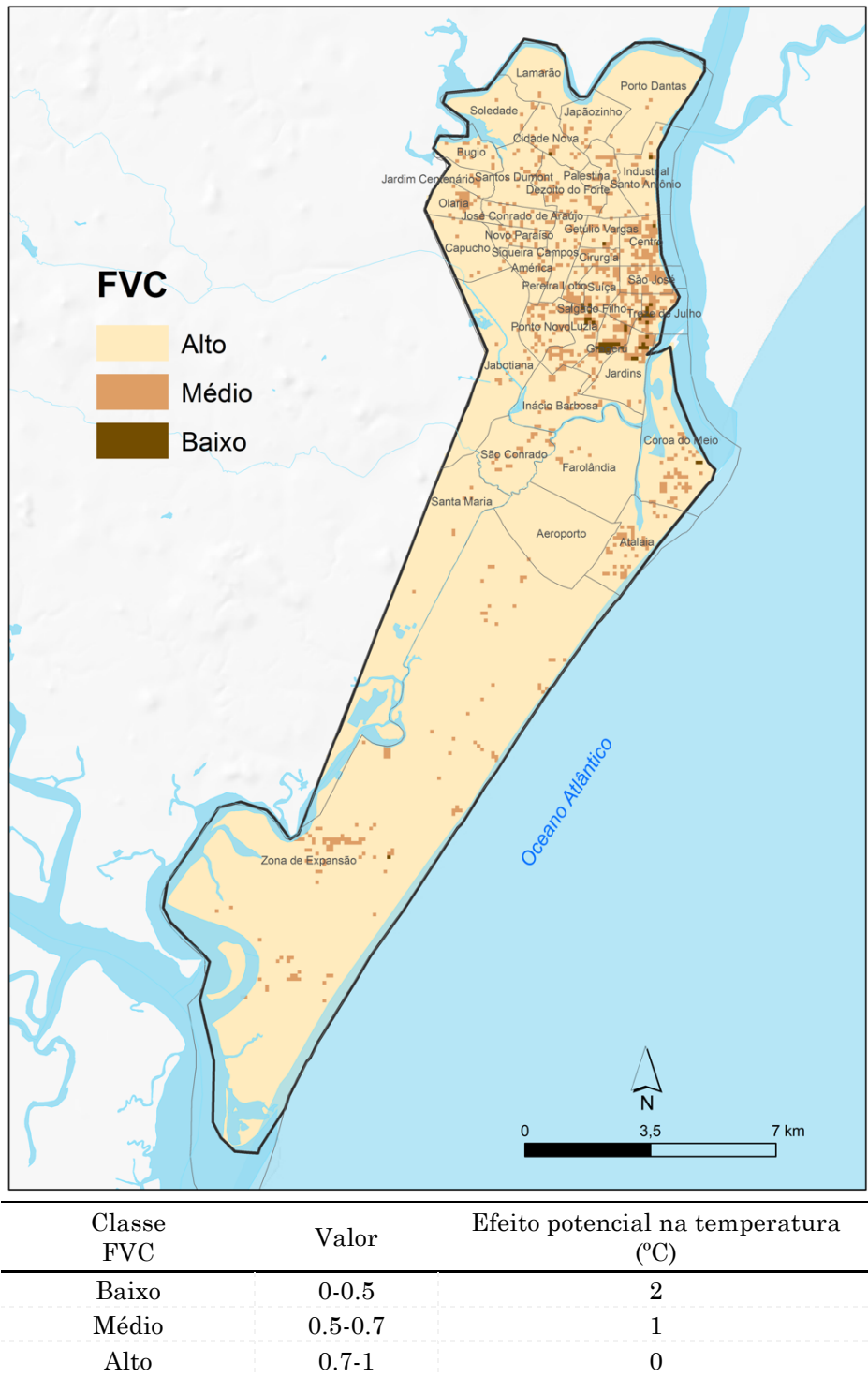


Figura 58: Camada 1 - FVC em Aracaju resolução 100 x 100 metros.

3.2 Cartografia dos espaços verdes (camada 2)

No ambiente urbano o espaço verde influencia a temperatura. Esse fato denominado efeito de arrefecimento ou “*cooling effect*” considera o papel do espaço verde na redução da temperatura relativamente ao ambiente construído, uma vez que a presença da vegetação altera os balanços de radiação, energia e hídrico (evapotranspiração) entre a superfície sombreada e a copa das árvores. No capítulo 3 foi demonstrado a existência do efeito de arrefecimento pela Ilha de Frescor Urbano, a qual influenciou a redução média da temperatura entre 1.5 a 2°C em Aracaju, isto indica que o espaço verde pode ser considerado como um potencial indicativo na redução do estresse térmico. Além disso, foi verificado em Aracaju que a redução da temperatura esteve relacionada aparentemente com as características físicas da vegetação, a propriedade da superfície e a rugosidade dos elementos no ambiente circundante. Como foi discutido no capítulo 3, parques com relva e poucas árvores estiveram mais aquecidos do que as áreas construídas circundantes porque a densidade de árvores pode diminuir a velocidade do vento no interior do parque (Heisler, 1990, 1994). Em virtude disso, o mapa dos espaços verdes de Aracaju considerou distinguir as áreas com relva das áreas com árvores do porte arbóreo em função das diferenças na rugosidade aerodinâmica e potencial efeito de arrefecimento que lhes são conferidas.

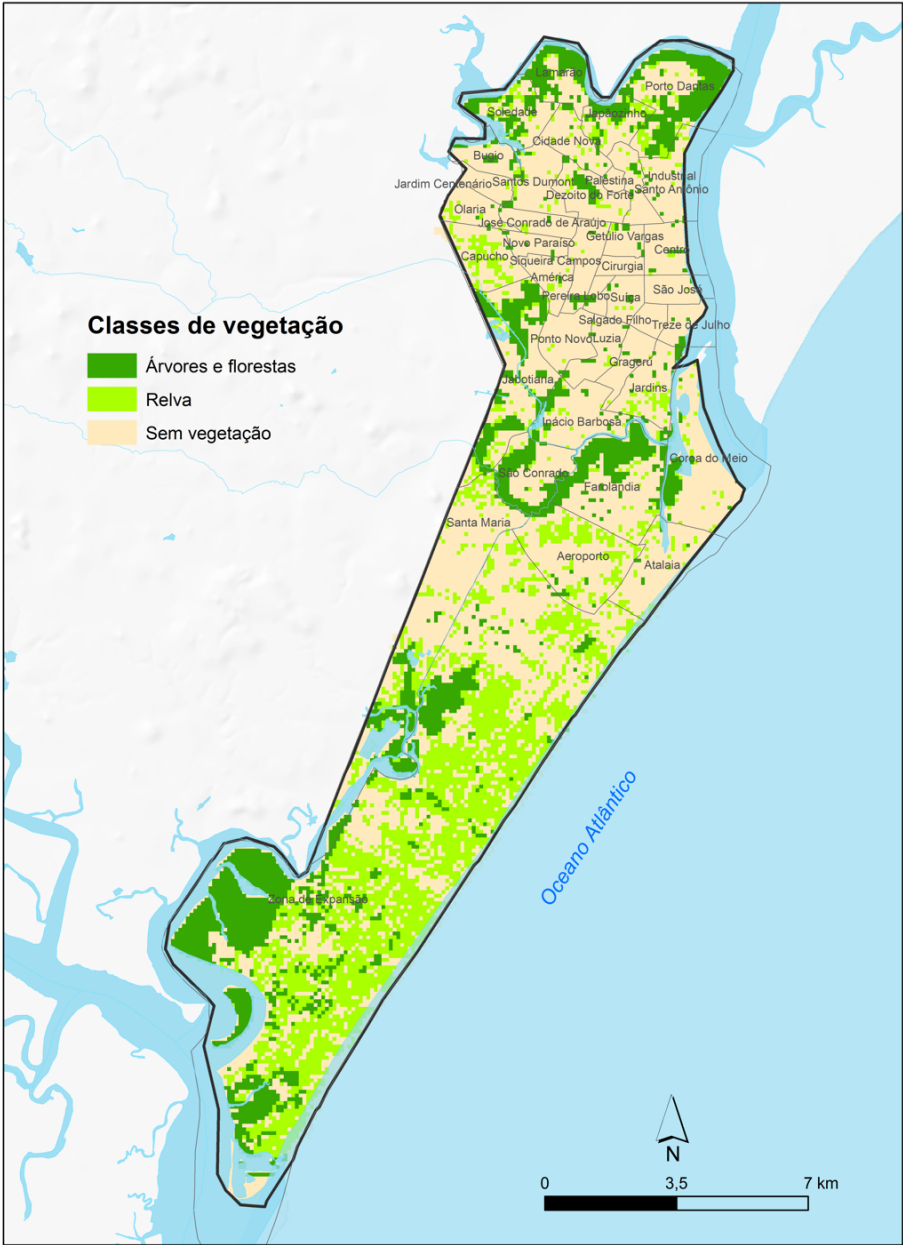
3.2.1 Dados de entrada e operação no ambiente SIG

- Arquivo vetor (.shp) da copa das árvores;
- Imagem de satélite Quickbird (.tiff) com resolução de 2.4 metros;

Para gerar o mapa dos espaços verdes de Aracaju foi usada a ferramenta *Feature Analyst* extensão do ARCGIS. Esta ferramenta permite identificar elementos físicos da cidade através das imagens de satélite. A alta resolução das imagens Quickbird ajudou a distinguir melhor a densidade de vegetação com relva da arbórea, o que permitiu extrair as árvores presentes nas vias da cidade, o que não é possível, por exemplo, com base no índice NDVI. Ao criar uma amostra de assinaturas correspondentes a relva e a árvore de porte arbóreo, essa ferramenta gerou um arquivo vetor com as áreas cobertas de vegetação distintas que, em seguida, foi convertido em arquivo grid.

3.2.2 Mapeamento dos espaços verdes

A classificação dos espaços verdes e seu efeito térmico basearam-se no estudo apresentado no capítulo 3 em que foi constatado que o espaço verde pode reduzir até 2°C a temperatura intra-urbana. O mapa dos espaços verdes e as classes indicando o seu efeito térmico podem ser vistos na Figura 59.



| Classe | Efeito potencial na temperatura |
|---------------------|---------------------------------|
| Árvores e florestas | -2°C |
| Relva | -1°C |
| Sem vegetação | 0 |

Figura 59: Camada 2 - Espaços verdes de Aracaju com resolução de 100 x 100 metros.

3.3 Resultado do mapeamento da morfologia urbana

O mapa da morfologia urbana de Aracaju foi gerado a partir do cruzamento da camada 1 (FVC) e camada 2 (espaços verdes). A classificação dos valores (pixel) relativa ao efeito na temperatura foi obtida com a soma dessas camadas usando a função “*raster calculator*” no ARCGIS. As classes urbanas em elevadas, médias e baixas foram obtidas pelos valores de densidade apresentados no histograma tendo em conta o conhecimento prévio

da morfologia urbana local. Em seguida, efetuou-se um pós-processamento no arquivo *grid* com a função “majority filter” para gerar o mapa final da morfologia urbana (Figura 60).

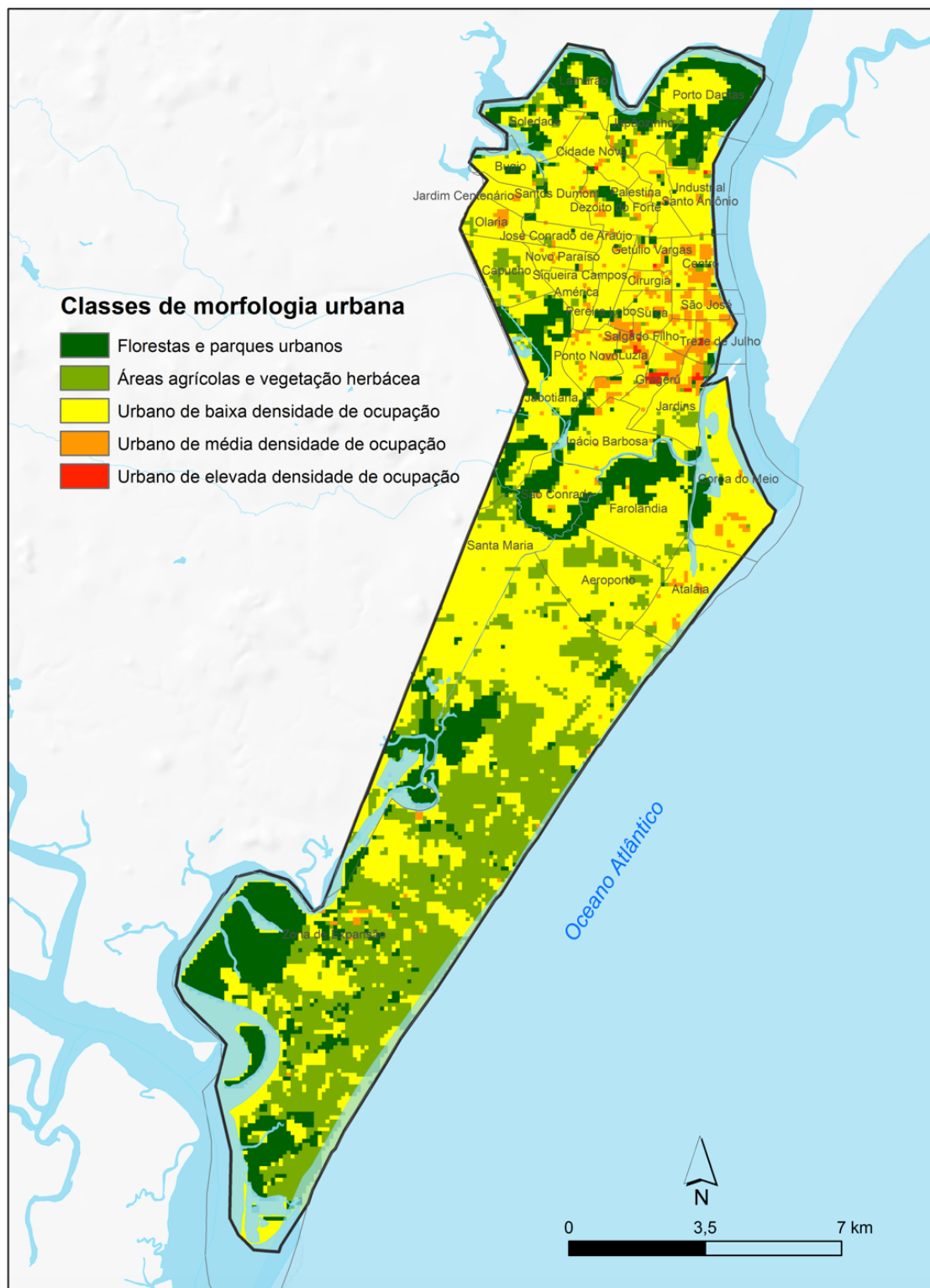


Figura 60: Morfologia urbana de Aracaju com resolução de 100 x 100 metros.

4 Mapa de classes de ventilação

4.1 Cartografia da rugosidade aerodinâmica (camada 3)

A rugosidade aerodinâmica é um dos principais fatores que diferencia os campos de vento diminuindo a velocidade de escoamento do ar junto à superfície (Lopes, 2003, p.118). O comprimento de rugosidade (z_0) e o deslocamento do plano zero (z_d) são parâmetros de rugosidade que descrevem, modelam e prevêm o comportamento do vento na camada limite atmosférica (Grimmond e Oke, 1999). Segundo Lopes (2003, p.47), o z_0 corresponde à altura a partir do solo onde a velocidade do vento é igual a zero, se o perfil do vento tiver uma variação logarítmica com altitude. O z_d representa o nível onde o fluxo médio da quantidade de movimento é absorvido e depende da volumetria dos elementos urbanos (Lopes, 2003 citando Rotach, 1994). Além desses, tem altura média dos elementos rugosos (z_H) que é o parâmetro de rugosidade mais comum e que pode representar uma aproximação de primeira ordem da z_0 (Burian et al., 2002). A Figura 61 mostra a representação desses três parâmetros de rugosidade na área urbana.

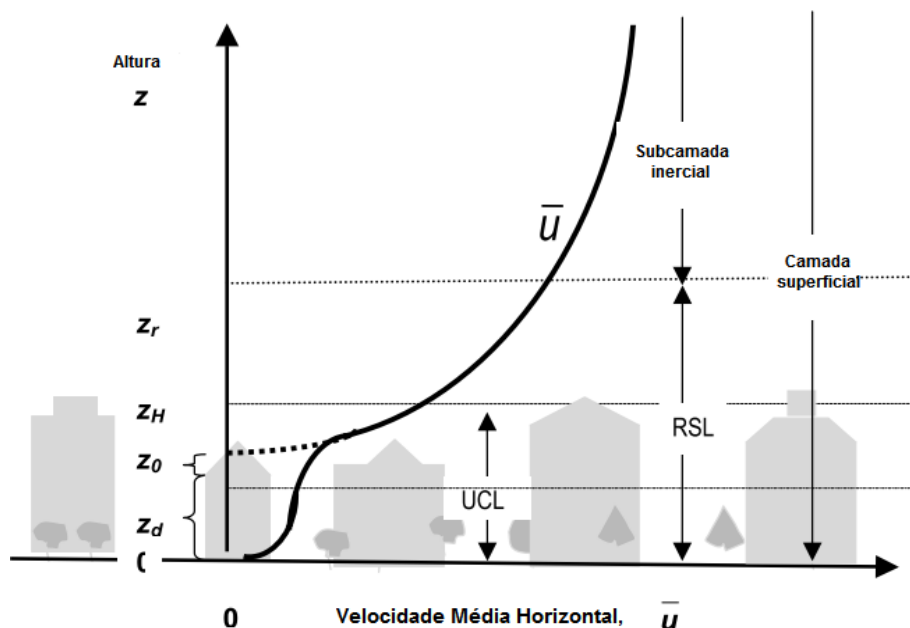


Figura 61: Perfil genérico da velocidade média do vento em uma área urbana densamente ocupada e a relação com z_0 , z_d e z_H (adaptado de Oke, 2006a, p. 22).
Nota: A linha tracejada mostra a extrapolação do perfil na subcamada inercial e a linha cheia o perfil real.

No contexto das URCH, a rugosidade da superfície é relevante porque produz informações pelas quais a atmosfera urbana inferior é afetada em função do vento, e conseqüentemente, tem influência direta na temperatura e na qualidade do ar. A premissa é considerar que quanto o maior z_0 menor a velocidade do vento, seguindo a relação logarítmica, o que significa que maior será o armazenamento de calor entre os edifícios e dificuldade de dispersão dos poluentes atmosféricos, pois os fluxos turbulentos diminuem dentro dos *canyons* urbanos.

4.1.1 Dados de entrada e operação no ambiente SIG

- Arquivo MDT (.grid) para extração da altura dos edifícios;
- Arquivo vetor (.shp) com a forma e altura (m) dos edifícios;
- Arquivo vetor (.shp) da copa das árvores com altura (10 metros como padrão);
- Arquivo vetor (.shp) com os pontos onde a rugosidade é calculada.

Para o cálculo da rugosidade aerodinâmica de Aracaju foi usado o software *Roughness Mapping Tool* desenvolvido por Gál e Unger (2009, 2014) e Unger et al., (2014), cuja interface se assemelha ao software usado no cálculo do FVC. O *Roughness Mapping Tool* inclui o cálculo do z_0 e o z_d que são designados para grupos de edifícios homogêneos e irregulares, o que se mostra adequado para a complexa morfologia urbana de Aracaju. O método calcula a fração da área frontal que combina a média da altura, a largura e a densidade (volumetria) dos elementos rugosos, conforme a equação:

$$z_0 = (h - z_d) \exp \left(- \frac{\kappa}{\sqrt{0.5 \cdot C_{Dh} \cdot \lambda_F}} \right) \quad (14)$$

onde C_{Dh} é coeficiente de atrito para os obstáculos isolados e tem a constante (0.8) e λ_F é a fração da área frontal de uma área elementar. Substituindo a constante, o z_0 pode ser expresso mais simplesmente pela equação (Gál e Unger, 2009):

$$z_0 = (h - z_d) \exp \left(- \sqrt{\frac{0.4}{\lambda_F}} \right) \quad (15)$$

Com base nessa equação, o z_d pode ser expresso da seguinte forma:

$$z_d = h \times (\lambda_P)^{0.6} \quad (16)$$

onde λ_P é a fração do edificado de uma área elementar. A Figura 62 mostra os parâmetros de entrada usados no cálculo da rugosidade para um grupo de construção irregular. A base do cálculo é uma quadra ou lote de edifícios que, ao aproximar-se uns com os outros, unem-se dentro dessa quadra. Em seguida, divide-se a área de estudo, baseando-se nas quadras que incluem os polígonos dos edifícios.

O modelo assume a área de superfície total ou área de lote (A_T) como a área de um polígono (Figura 62 (a)), que leva em conta a soma das áreas dos edifícios (*footprint*) (A_{P1} , A_{P2} , A_{P3} , ..., A_{Pn}) e a área do plano (A_P). A fração de área construída referente a um polígono é dada por $\lambda_P = A_P/A_T$. O mesmo procedimento é realizado para obter a fração de área relativa à copa das árvores (A_{Pt}). No que diz respeito a área frontal (A_F), o modelo assume a soma da área frontal de cada edifício (A_{F1} , A_{F2} , A_{F3} , ..., A_{Fn}). A área frontal de uma quadra de edifícios depende da direção do fluxo de ar, que para este estudo, foi usada a direção prevalente de 90° . Desse modo, a fração da área frontal referente a um polígono e a sua orientação é dada por $\lambda_F = A_F / A_T$ (Figura 62 (b)).

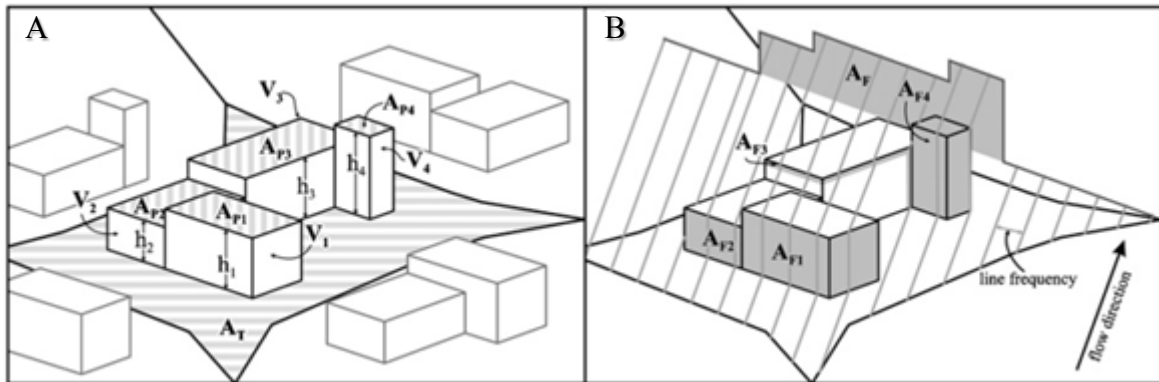


Figura 62: (A) Parâmetros de entrada no cálculo de rugosidade para um grupo de construção irregular e (B) cálculo de área frontal com linhas paralelas em uma determinada direção, adaptado de Gál e Unger (2009).

A base de dados 3D e os procedimentos usados para o cálculo da rugosidade da área total de Aracaju foram semelhantes àqueles usados no cálculo do FVC (a exceção foi o número de pontos que se reduziu para 1.476). Uma vez definidos todos os parâmetros de entrada, o modelo gera um polígono de pontos em que são calculados os valores dos parâmetros rugosos z_0 e z_d . Ao introduzi-los no ARCGIS, a função “Merge” juntou todos os 38 arquivos. Em seguida, foram gerados os mapas de rugosidade aerodinâmica (.grid) com

resolução de 100 metros. A Figura 63 mostra a distribuição espacial dos valores de z_0 , z_d e z_H em Aracaju.

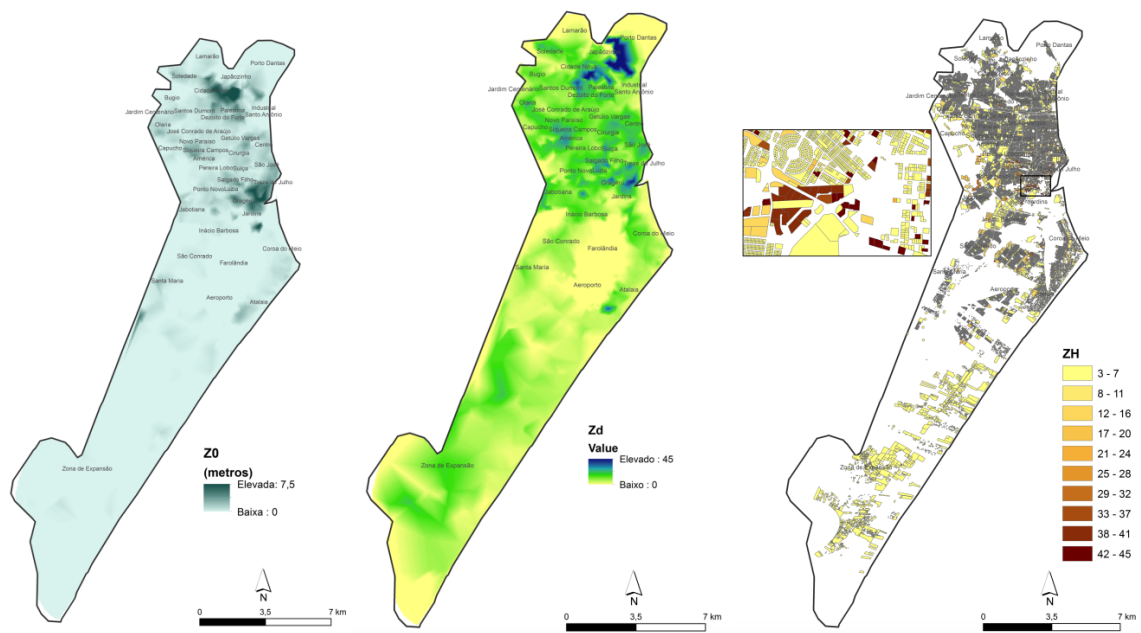
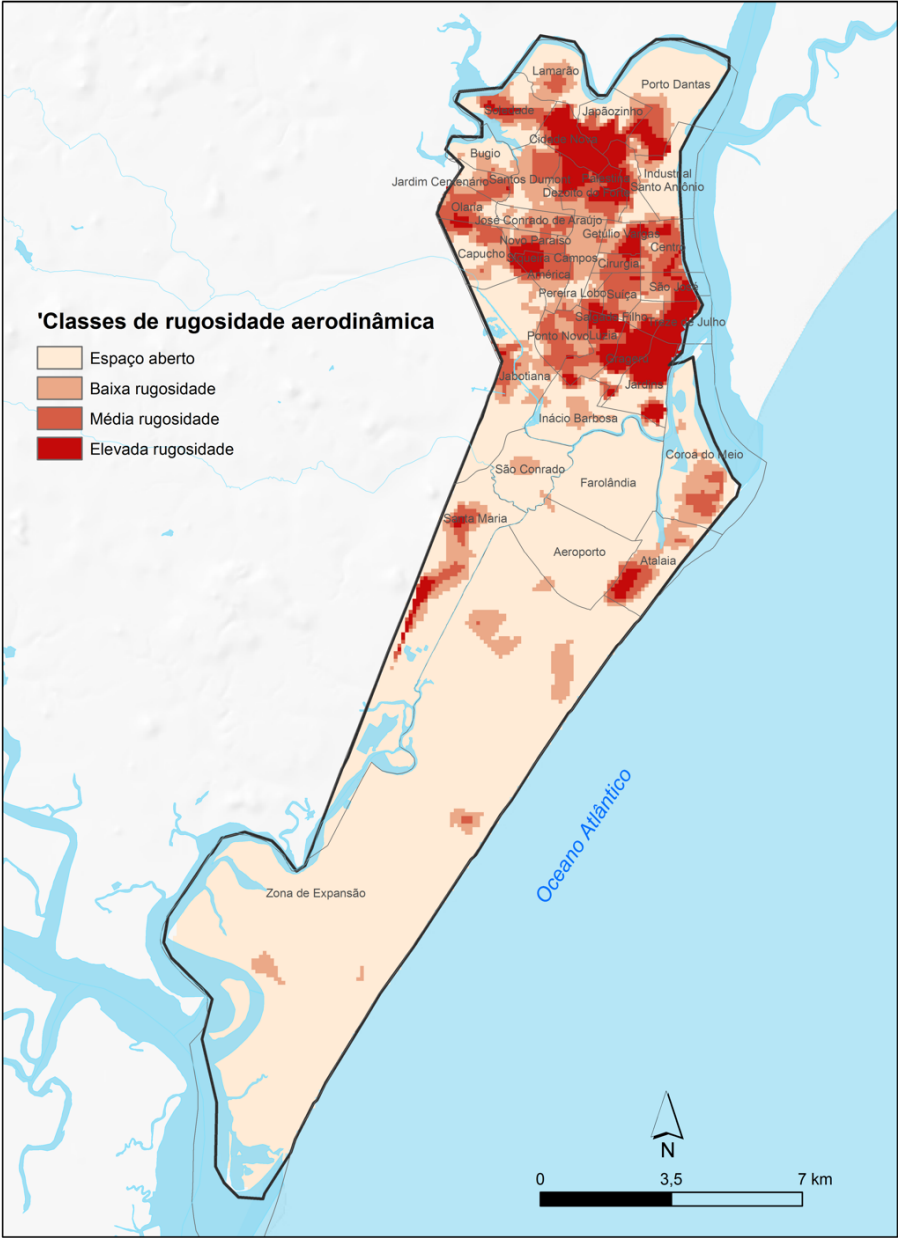


Figura 63: Representação espacial dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica (z_0 , z_d e z_H) em Aracaju.

4.1.2 Mapeamento da rugosidade aerodinâmica

A classificação da rugosidade de Aracaju baseou-se na descrição detalhada dos parâmetros z_0 , z_d e z_H ajustados às escalas de rugosidade urbana de Davenport et al., (2000). As classes de rugosidade de Davenport são uma medida genérica do uso do solo e obstáculos amplamente usadas nos estudos de clima urbano (Oke, 2006a; Stewart e Oke, 2012). Essa classificação reflete um incremento proporcional no efeito do vento devido ao aumento da altura e densidade dos edifícios. Como o z_0 tem relação direta com a velocidade do vento (Oke, 1987), então, espera-se que uma diminuição do z_0 corresponde a uma diminuição da temperatura. Para representar essa relação em Aracaju, recorreu-se à análise de temperatura das estações urbanas, visto que os locais que representam, levam em conta o papel da rugosidade na ventilação urbana. Nesse sentido, assumiu-se a estação urbana Praia José Sarney como aquela estação referência para designar a influência da rugosidade na temperatura, dada a sua localização à beira do mar com baixa densidade de edifícios e mais exposta à ação do vento. Foi constatado no capítulo 4 que Praia José Sarney apresentou, em relação as demais estações urbanas, uma diferença na temperatura até -2°C durante a *estação fresca* e -1.5°C durante a *estação quente*. Baseado nesses resultados, o mapa de rugosidade pode ser classificado, de maneira que, a menor rugosidade possível indica a amenização da

temperatura de até -2°C (efeito negativo). O mapa de rugosidade aerodinâmica e as classes indicando o seu efeito potencial na temperatura podem ser vistos na Figura 64.



| Classe de rugosidade | Z_0 (m) | Média Z_d (m) | Média Z_H (m) | Efeito potencial na temperatura |
|----------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Espaço aberto | 0 - 0.25 | 3.5 | 5.5 | -2°C |
| Baixa rugosidade | > 0.25 – 0.5 | 6.7 | 10 | -1°C |
| Média rugosidade | > 0.5 – 1.0 | 10 | 14 | 0°C |
| Elevada rugosidade | > 1.0 | 13 | 17 | 1°C |

Figura 64: Camada 3 - Rugosidade aerodinâmica e o seu efeito térmico em Aracaju.

4.2 Cartografia dos corredores de ventilação (camada 4)

Os corredores de ventilação urbana (*ventilation paths*) referem-se as áreas perpendiculares a uma direção do vento com alta probabilidade de passagem contínua de circulação do ar. A principal função dos corredores de ventilação neste estudo é permitir a contínua penetração (ou canalização) dos ventos dominantes de leste e sudeste. Mantendo os corredores de ventilação livres de obstáculos, espera-se uma amenização da temperatura e, possivelmente, uma melhoria na qualidade do ar próxima às vias movimentadas da cidade. Geralmente, os corredores de ventilação são definidos utilizando os critérios topográfico e morfológico (Matzarakis e Mayer, 1992; Alcoforado et al., 2005). Para o caso de Aracaju, no entanto, onde a influência topográfica é desprezível à mesoescala, considerou apenas o critério morfológico para delimitar os corredores de ventilação através do parâmetro rugosidade calculado previamente.

4.2.1 Dados de entrada e operação no ambiente SIG

- Mapa de rugosidade aerodinâmica com resolução de 100 x 100 metros.

Os corredores de ventilação foram definidos com base no método de mapeamento de Gál e Unger (2009) e Matzarakis e Mayer (1992) que consideram a distribuição espacial dos parâmetros rugosos (z_0 e z_d) no espaço urbano. Basicamente, a delimitação do corredor de ventilação deve atender aos seguintes critérios:

- (i) O valor de z_0 deve ser menor que 0.5 m;
- (ii) O valor de z_d é negligenciável, se for menor que 3 m;
- (iii) Área com comprimento suficientemente grande (> 1 km) para uma determinada direção (grelha (.grid) de 1000 x 1000m criada usando a função *fishnet* ARCGIS);
- (iv) Área com largura suficientemente grande (até 50 m) com o objetivo de delimitar mais precisamente o corredor de ventilação. Para isso, foi criada uma nova grelha com células de 50 x 50m acoplada em cada área do item (iii), de maneira que, o limite dessas células seja paralelo à direção selecionada (90° para este estudo).

O passo seguinte do método foi selecionar os polígonos que atendem aos critérios (i) e (ii) e, dentro do polígono maior (iii), selecionar a maioria os polígonos referentes às células de 50m x 50m (iv). O traçado da área resultante dos polígonos selecionados define o corredor de ventilação (Figura 65).

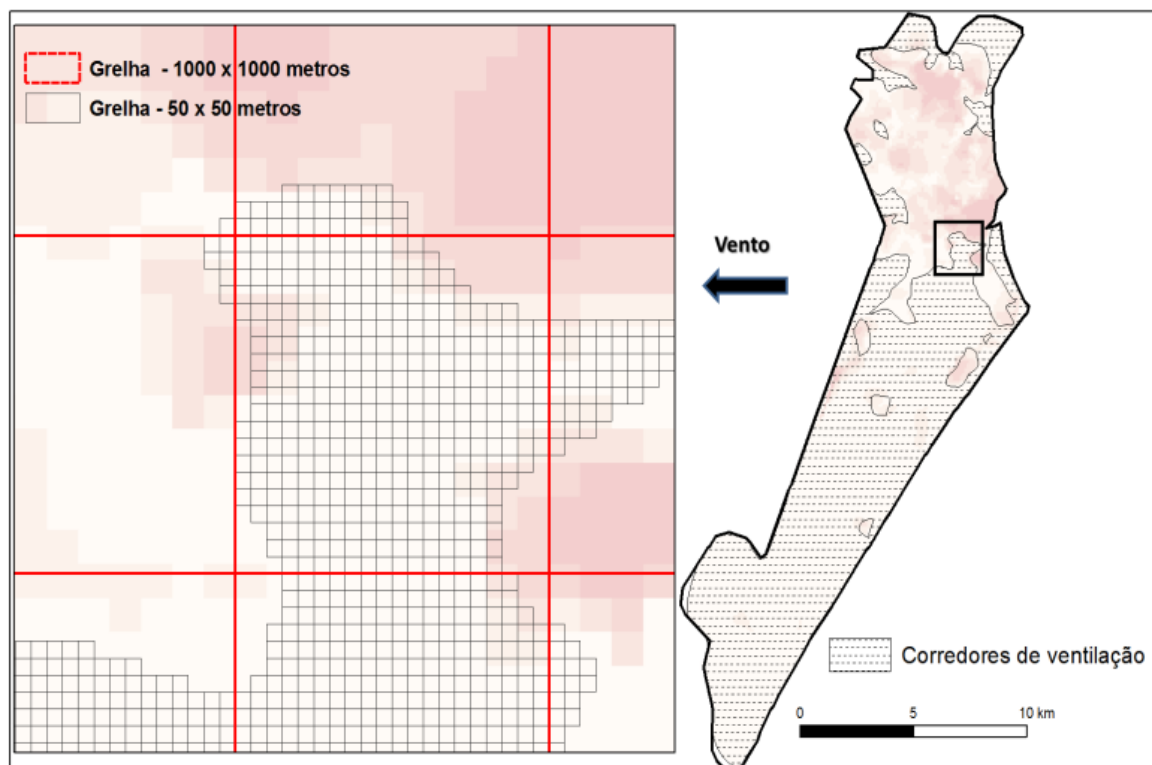


Figura 65: Construção dos corredores de ventilação em Aracaju.

4.2.2 Mapeamento dos corredores de ventilação

Para a classificação do mapa dos corredores de ventilação foi tido em conta que o z_0 até 0.5 metros pode baixar a temperatura em 1°C (efeito negativo). Desse modo, definiram-se as classes cerca de ventilação igual -1°C e sem corredor igual a 0°C (Figura 66).

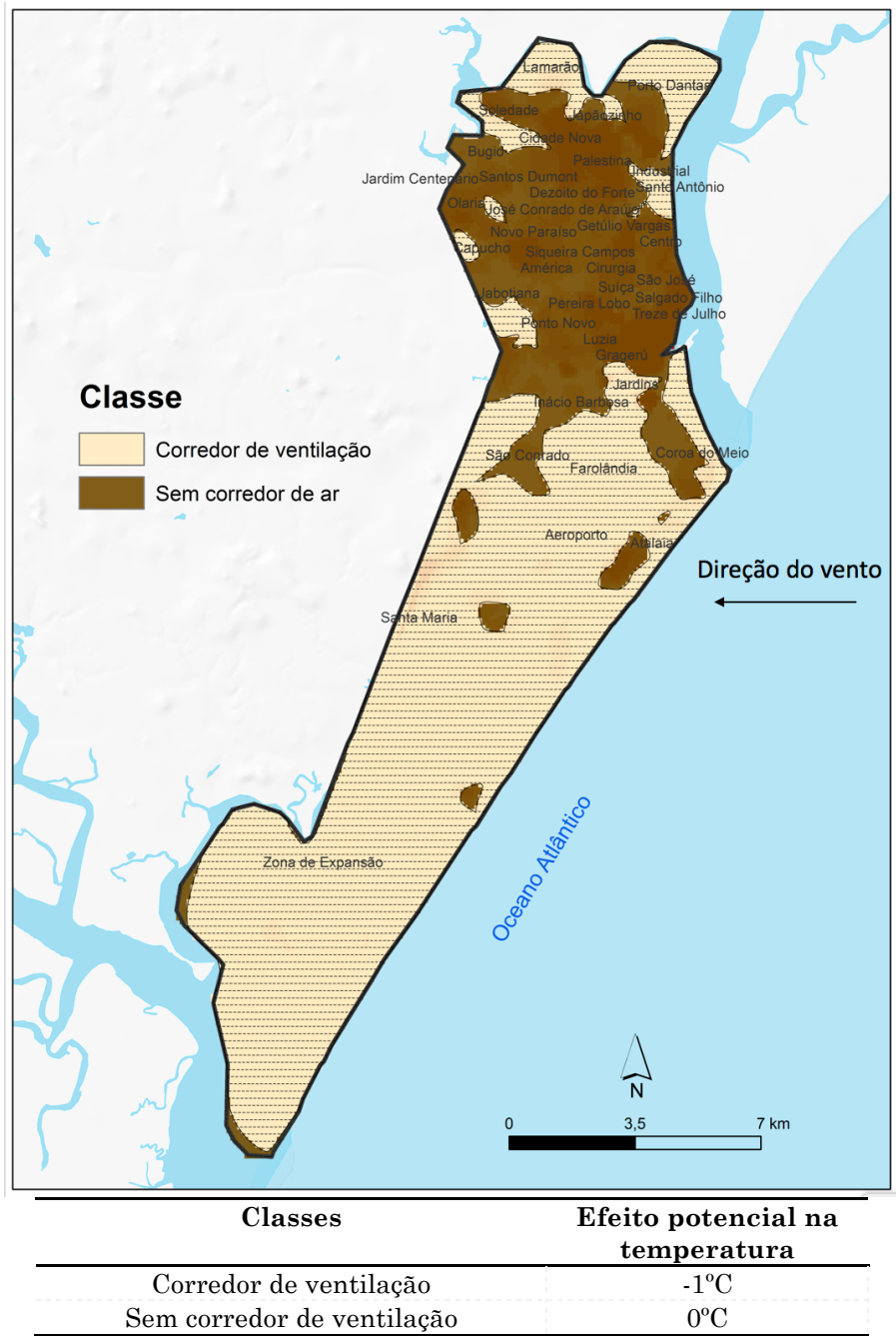


Figura 66: Camada 4 - Corredores de ventilação e as classes indicando o seu efeito na temperatura em Aracaju.

4.3 Resultado do mapeamento das classes de ventilação

A partir do cruzamento da rugosidade aerodinâmica com os corredores de ventilação obteve-se o mapa da “classes de ventilação” que corresponde as áreas com comportamento aerodinâmico homogêneo seja pela canalização do ar e pelas áreas de ventilação deficiente. A classificação dos valores (pixel) relativos ao efeito na temperatura foi obtida com a soma da camada 3 e camada 4 usando a função “*raster calculator*” no ARCGIS. Em seguida,

efetuou-se um pós-processamento no *raster* com a função “*majority filter*” para gerar o mapa final das classes de ventilação (Figura 67 e tabela 23).

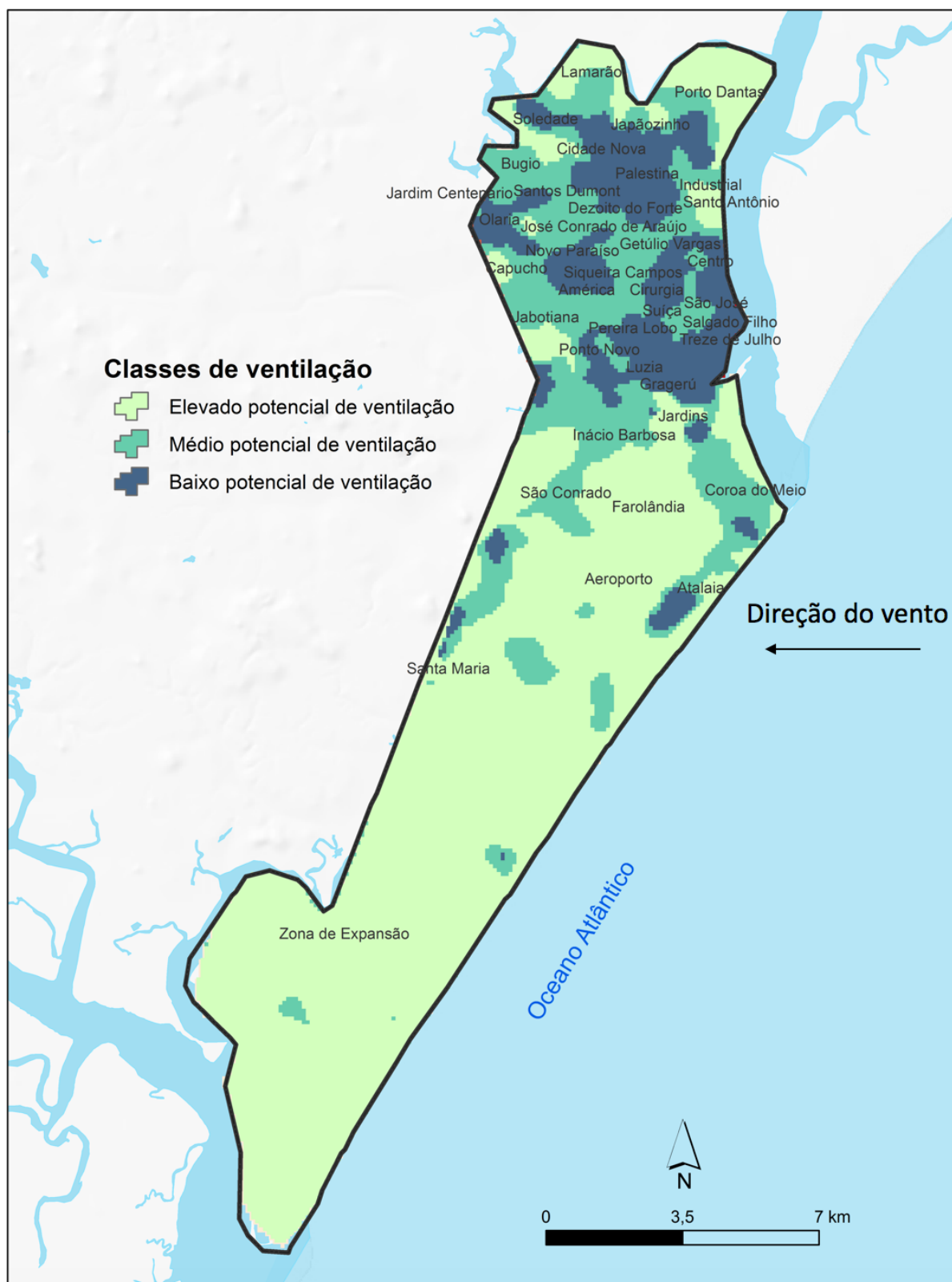


Figura 67: Classes de ventilação urbana em Aracaju.

Tabela 22: Descrição das classes de ventilação de Aracaju.

| Classes de ventilação | Correspondência com a rugosidade aerodinâmica | Correspondência com a morfologia urbana | Critérios de delimitação |
|-----------------------------|---|--|---|
| Áreas com baixo potencial | Elevada rugosidade | Predomínio de ocupação urbana de elevada a média densidade | Valores de $z_0 = > 0.5$ |
| Áreas com médio potencial | Média rugosidade | Predomínio de ocupação urbana de média a baixa densidade; áreas florestais com a presença de parques urbanos. | Valores de $z_0 = > 0.25 - 0.5m$ |
| Áreas com elevado potencial | Espaço aberto ou baixa rugosidade | Predomínio de ocupação urbana de baixa densidade, espaços abertos e de áreas agrícolas com vegetação herbácea. | Faixa do litoral (limite de costa); baixa rugosidade com valores de $z_0 = < 0.25m$ |

5 Mapa das Local Climate Zones (camada 5)

As *Local Climate Zones* (LCZ) constituem um sistema de classificação alternativo da paisagem urbana e foi usado neste estudo porque ajuda a definir as URCH. Proposta por Stewart e Oke (2012), as LCZs definem-se como unidades térmicas em que as propriedades geométricas (altura e espaçamento dos edifícios, FVC, volumetria), cobertura de superfície (permeáveis ou impermeáveis) e atividade humana são semelhantes. A paisagem urbana é classificada genericamente em 17 padrões térmicos em que cada um é representado pela escala de bairro ou local que se estende de centenas de metros a vários quilômetros em escala horizontal ($> 1km^2$) (Tabela 23).

Nos últimos anos, a classificação da ZLCs tem ganho cada vez mais importância nos estudos de clima urbano devido à sua versatilidade aplicacional e modelagem climática o que tem ajudado a integrar o conhecimento do clima urbano no planejamento urbano (Stewart e Oke, 2012). O projeto *The World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT) baseia-se no compreensivo sistema das LCZs para desenvolver uma consistente base de dados físicos sobre o clima urbano ao redor do mundo. O projeto WUDAPT é uma iniciativa internacional com o objetivo fornecer informações climáticas para os governantes, estudiosos, arquitetos e planejadores (Mills et al., 2015). Várias cidades têm feito uso da metodologia disponibilizada pelo projeto e têm formulado as suas LCZs como Hamburgo (Bechtel, e Daneke, 2012), Glasgow (Emmanuel e Krüger, 2012), Szeged (Lelovics, 2014), Phoenix

(Middel, 2014), Dublin (Alexander e Mills, 2014), Berlin (Mitraka, 2015), Hong Kong (Ren et. al., 2016) e muitas outras cidades nos diferentes continentes¹⁵.

Tabela 23: Tipos de LCZ (Adaptado de Stewart e Oke, 2012).

| Tipo de construção | | Tipo de uso do solo | |
|--------------------|---|---------------------|---|
| LCZ1 | Ocupação compacta e edificações elevadas | LCZ A | Vegetação densa |
| LCZ2 | Ocupação compacta e edificações médias | LCZ B | Vegetação espaçada |
| LCZ3 | Ocupação compacta e edificações baixas | LCZ C | Arbustos isolados |
| LCZ4 | Ocupação aberta e edificações elevadas | LCZ D | Plantação rasteira |
| LCZ5 | Ocupação aberta e edificações médias | LCZ E | Rocha exposta ou superfície pavimentada |
| LCZ6 | Ocupação aberta e edificações baixas | LCZ F | Solo exposto ou arenoso |
| LCZ7 | Ocupação desordenada e edificações baixas | LCZ G | Corpos d'água |
| LCZ 8 | Grandes compartimentos e edificações baixas | | |
| LCZ9 | Ocupação espaçada com edifícios isolados | | |
| LCZ 10 | Zona industrial | | |

Basicamente os produtos extraídos do WUDAPT passam por três níveis (Mills et al., 2015): (i) nível 0 em que a paisagem urbana é descrita através da classificação das LCZs de Stewart e Oke (2012); (ii) nível 1 em que os parâmetros são refinados dentro de cada LCZ numa escala detalhada, como exemplo a forma tridimensional dos bairros e (iii) nível 2 em que o produto final consiste de informações mais precisas sobre as características morfológicas urbanas como materiais de construção, geometria dos edifícios (See et al., 2015).

O mapa das LCZs de Aracaju foi gerado no âmbito do projeto WUDAPT e realizado no *School of Geography, Planning & Environmental Policy da University College Dublin/ Irlanda* com a supervisão do Professor Gerald Mills, um dos líderes do projeto. Nessa ocasião, foram discutidas, em detalhes, questões teóricas e práticas acerca da utilização da LCZ no contexto de Aracaju, o que resultou, entre outras aplicações, a adoção das LCZs no quadro da URCH. No entanto, é importante fazer uma distinção singela entre LCZ e

¹⁵ <http://www.wudapt.org/cities/>

URCH, pois como bem colocam Stewart e Oke (2015) ambas diferem fundamentalmente nas suas definições. As URCH são um tipo de classificação baseada no conhecimento de especialista sobre a climatologia e a geografia local (topografia) em que se desenvolvem critérios únicos para a cidade, dependendo da disponibilidade do banco de dados sobre a morfologia urbana. A classificação das LCZs, entretanto, é baseada no conhecimento simplificado e generalista sobre o uso do solo e estrutura urbana bem como as conhecidas influências que esses parâmetros climáticos exercem nos padrões térmicos da cidade. As LCZs “não são adaptadas à topografia e climatologia locais da cidade ou área de estudo” (Stewart e Oke, 2015, p.400). No que diz respeito ao propósito das LCZ e URCH também se diferem. Sabe-se que as URCH são únicas (em nome e definição) e, como tal, não se prestam ainda às generalizações e comparações entre cidades, ao contrário das LCZs que tem isso como o seu meio e fim.

Por outro lado, a adoção das LCZs como uma camada no quadro das URCH de Aracaju mostra-se vantajosa pelo fato que (i) o sistema das LCZs é universal, o que permite a comparação entre lugares diferentes do mundo; (ii) fornece informações ou metadados úteis (propriedades térmicas, radiativa, geométrica, metabólica e de cobertura da superfície) que podem melhorar a consistência do sistema das URCH; (ii) URCH e LCZs são semelhantes em termos de escala espacial horizontal ($>1\text{km}^2$ e resolução de 100m) e (iii) URCH e LCZs visam aplicar o conhecimento sobre os padrões térmicos locais no planejamento urbano. Todavia, a adoção das LCZs pode não se aplicar perfeitamente a locais com topografia complexa (exemplo de Lisboa), que não é o caso de Aracaju.

5.1 Dados de entrada e operação no ambiente SIG

- Arquivo (.kmz) com as assinaturas das LCZs;
- Imagens de Landsat8 (LC82150672013344LGN00 – Dez 2015; LC82150672013360LGN00 – Abril 2015)

Como foi designado para ser universal, o método¹⁶ WUDAPT é relativamente simples e usa fontes de dados (imagens de satélite) e software livres e de fácil acesso (SAGA e Google Earth) (Bechtel et al., 2015) (Figura 68). Os procedimentos usados na elaboração do mapa das LCZs de Aracaju seguem algumas etapas (Figura 68):

¹⁶ Os procedimentos metodológicos para a elaboração desse tipo de mapa estão disponíveis no site do projeto <http://www.wudapt.org/> pelo que aqui abordaremos somente os mais importantes passos referentes à sua construção no contexto da URCH.

| Built types | Definition | Land cover types | Definition |
|-------------------------|--|---|--|
| 1. Compact high-rise | Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials. | A. Dense trees | Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park. |
| 2. Compact midrise | Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials. | B. Scattered trees | Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park. |
| 3. Compact low-rise | Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials. | C. Bush, scrub | Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture. |
| 4. Open high-rise | Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials. | D. Low plants | Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park. |
| 5. Open midrise | Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials. | E. Bare rock or paved | Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation. |
| 6. Open low-rise | Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials. | F. Bare soil or sand | Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture. |
| 7. Lightweight low-rise | Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal). | G. Water | Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons. |
| 8. Large low-rise | Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials. | VARIABLE LAND COVER PROPERTIES | |
| 9. Sparsely built | Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). | Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles. | |
| 10. Heavy industry | Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials. | b. bare trees | Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo. |
| | | s. snow cover | Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo. |
| | | d. dry ground | Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo. |
| | | w. wet ground | Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo. |

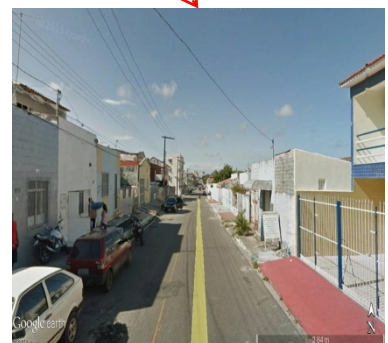


Figura 68: Exemplo de definição das assinaturas espectrais com base na classificação das LCZs.

- I. Realização do pré-processamento das imagens de satélite Landsat8 (resolução de 30 m) disponibilizadas gratuitamente no site da USGS¹⁷ (U.S. *Geological Survey*) as quais foram ajustadas para a região de interesse ao redor de Aracaju (RDI).
- II. Dentro da RDI são digitalizadas as assinaturas (*training areas*) de acordo com o entendimento das LCZs. Uma assinatura é um polígono criado no Google Earth (.kml) que representa a área correspondente a uma determinada classe da LCZ, considerando a compacidade dos elementos físicos (edifícios, árvores, corpos d'água) e tipo de superfície no território. A qualidade e o número de assinatura das LCZs influenciam diretamente a qualidade da análise, pois minimiza o erro causado pelo julgamento subjetivo (Ren et al., 2016).
- III. As imagens Landsat8 pré-processadas e as assinaturas são importadas para o software livre *System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA-GIS). No SAGA, é realizada a classificação supervisionada usando o algoritmo *random forest* em que os valores das características das LCZs são atribuídos. Esse algoritmo gera vários grupos (*decision*) de “árvores” com as características de superfície extraídas dentro e fora das assinaturas e combina o resultado para atribuir probabilisticamente tipos de LZCs para cada célula (Bechtel et al., 2015).
- IV. O resultado da classificação é um arquivo no formato grid (.kml) que pode ser revisto para uma maior consistência do mapa da LCZ repetindo as etapas I e II.

5.2 Apresentação das LCZs em Aracaju

O mapa da Figura 69 mostra o mapa das LCZs gerado para região ao redor de Aracaju onde é possível identificar na área central cidade, as LCZ3 (Ocupação compacta e edificações baixas), LCZ4 (Ocupação aberta e edificações elevadas), LCZ5 (Ocupação aberta e edificações médias) e LZC7 (Ocupação desordenada e edificações baixas). As paisagens das áreas fora do centro foram classificadas pelas LCZ9 (Ocupação espaçada com edifícios isolados), LCZ6 (Ocupação aberta e edificações baixas), LCZA (Vegetação densa) e LCZB (Vegetação espaçada).

¹⁷ <https://www.usgs.gov/>, acesso em 5 de setembro de 2015.

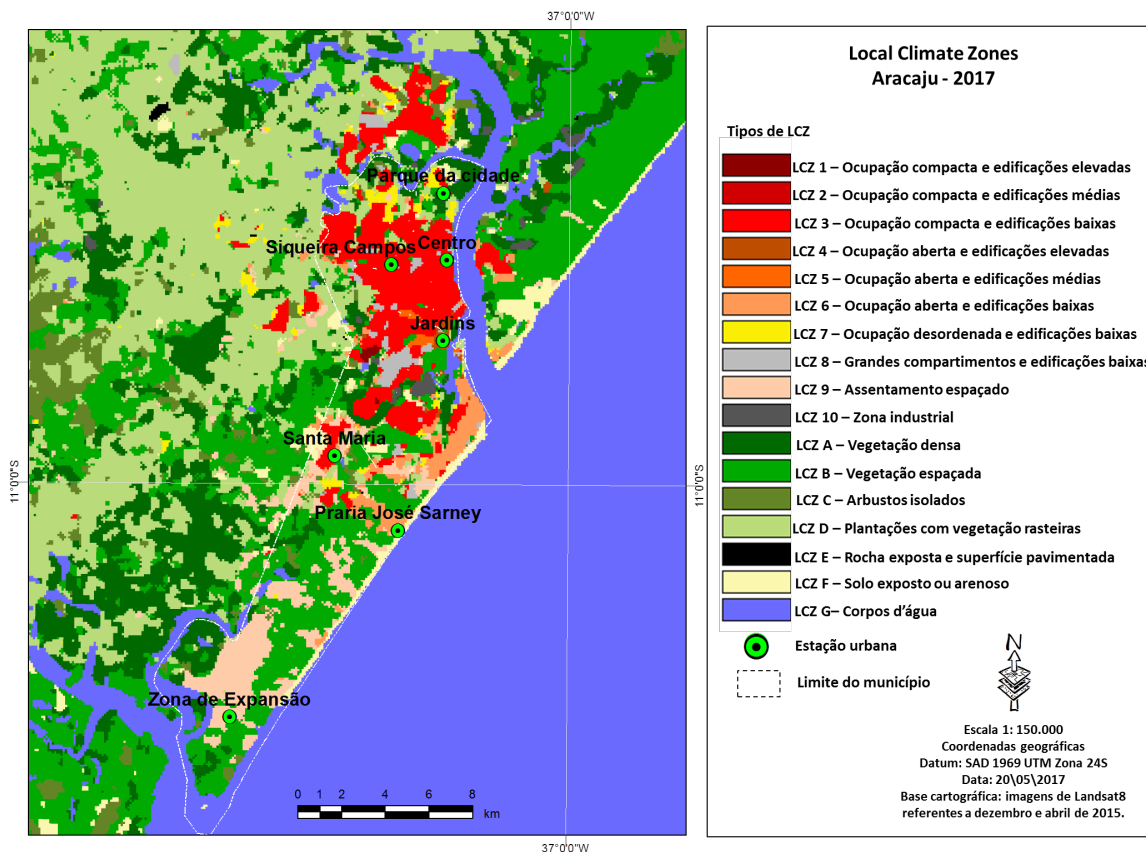


Figura 69: Local Climate Zones de Aracaju, 2016.

O mapa da LCZs reflete a distribuição dos padrões térmicos em Aracaju e, como tal, pode ser interpretado como um potencial elemento no quadro das URCH. No entanto, para incorporar a classificação da LCZ para na URCH, foram realizados três procedimentos: (i) validação através da criação de uma matriz de confusão, (ii) análise da influência da LCZs na temperatura e (iii) a redefinição das LCZs.

5.3 Precisão do mapa das LCZs

Uma matriz de confusão foi construída a fim de avaliar a precisão do mapa das LCZs. Para isso, foi criada um novo conjunto de assinaturas de LCZs aleatórias no terreno, independente das assinaturas criadas anteriormente. A matriz de confusão gerada correspondeu a amostra de pontos de 10% por classe de LCZ donde se extraiu os valores globais de precisão 69% e o índice Kapa de 0.65 (Tabela 24). Destacaram-se com as maiores precisões a LCZ3 com 68% (28 pontos), seguida de LCZB com 68% (19), LCZ9 com 73% (15), LCZF com 93% (15), LCZ7 com 75% (12) e LCZA 70% (10). Esses resultados demonstram uma precisão razoavelmente satisfatória da classificação do LCZ para com o contexto local.

Tabela 24: Matriz de confusão das LCZs de Aracaju

| | Tipos de LCZs | | | | | | | | | | | | | | | Total pontos classificados | Precisão (%) |
|------------------------------|---------------|------|------|---|------|----|------|------|-----|------|------|----|----|------|------|----------------------------|--------------|
| | 1 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | A | B | C | D | E | F | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 100 |
| 3 | 0 | 19 | 1 | 0 | 0 | 3 | 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 | 68 |
| 4 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 100 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 57 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 75 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 87 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 11 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 73 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 |
| A | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 10 | 70 |
| B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 19 | 68 |
| C | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 4 | 25 |
| D | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 1 | 4 | 0 | 1 | 10 | 40 |
| E | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 | 100 |
| F | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 14 | 15 | 93 |
| Total pontos coletados | 0 | 22 | 3 | 2 | 6 | 15 | 13 | 13 | 0 | 15 | 15 | 5 | 5 | 9 | 16 | | |
| Precisão do produtor | 100 | 86.3 | 66.6 | 0 | 66.6 | 60 | 53.8 | 84.6 | 100 | 46.6 | 86.6 | 20 | 80 | 44.4 | 87.5 | | |
| Valor global de precisão (%) | | 69 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Índice Kappa | | 0.65 | | | | | | | | | | | | | | | |

5.4 Relação entre as LCZs e os padrões de temperatura

Consideram-se as anomalias relativas de temperatura de cada estação urbana calculada na equação 2 para analisar os padrões térmicos na perspectiva das LCZs. No período 2014-2016, foram selecionadas as médias de temperaturas do turno diurno (12:00h-20:00h) sazonais nas condições meteorológicas presentes na cidade com velocidades dos ventos $4 < x < 6 \text{ ms}^{-1}$ e condições de céu *parcialmente nublado* (Capítulo 3). A figura 71 mostra as maiores anomalias ocorrendo durante a estação fresca com destaque para as LCZ4 (1°C) e LCZ3 (entre 0,5 a 0,7°C), em contraste com a LCZA (-1,2°C), a LCZ6 (-0,9°C) e LCZ9 (-0,4).

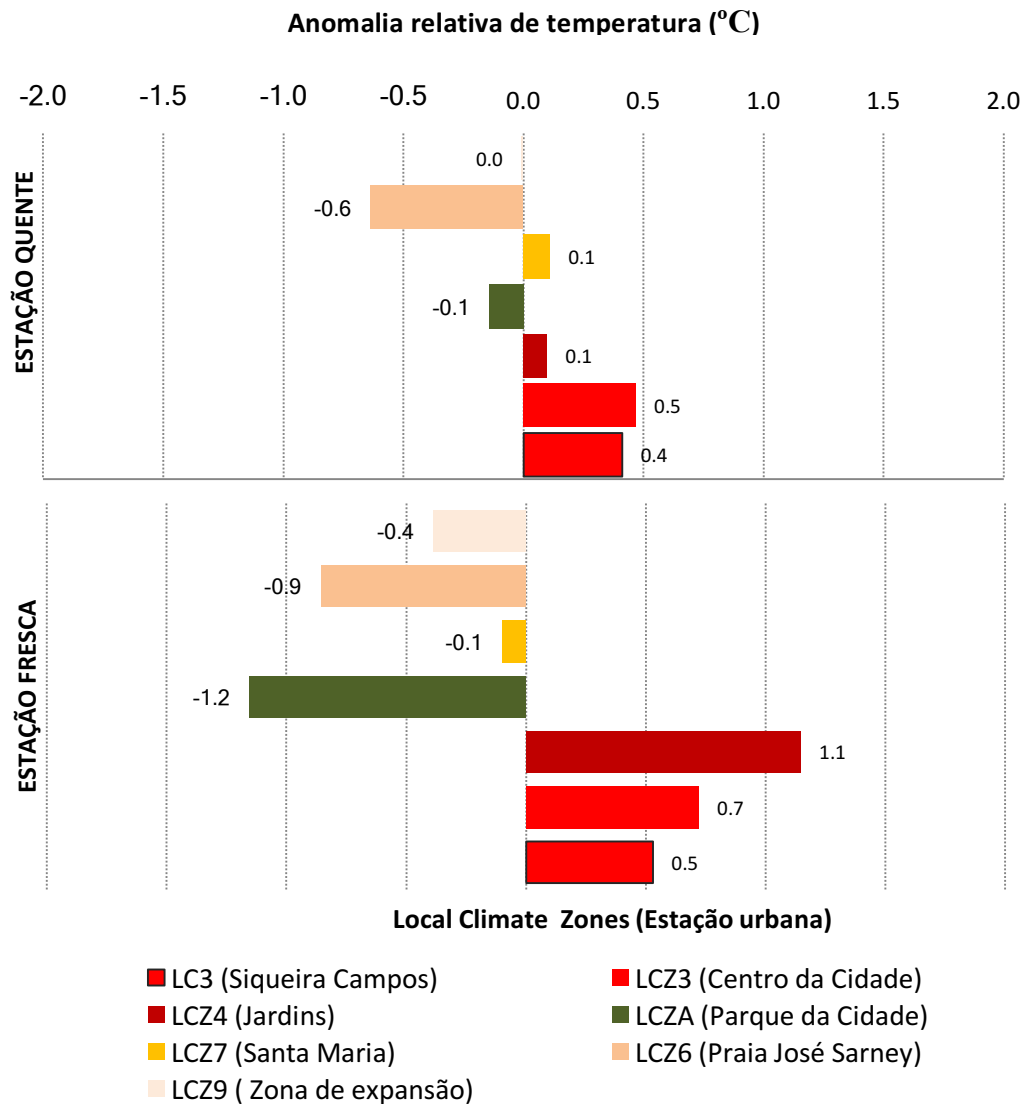


Figura 70: Anomalias relativas de temperatura de sete LCZs em Aracaju no período de 2014-2016.

Com base na informação anterior, interpretaram-se os resultados através da espacialização da temperatura do ar intraurbana derivada no contexto das LCZs, usando a abordagem do mapeamento em grade (Alexander e Mills, 2014). Essa abordagem consistiu em criar uma grade com dimensão de 1 km² compatível com a escala de local para a qual a classificação do LCZ foi designada e atribuir o valor de temperatura de cada estação urbana ou LCZ às células da grade não amostradas, predizendo as temperaturas interpoladas pelo método *krigagem* (Figura 72). O mapa da Figura 72 ilustra o resultado do mapeamento das LCZs na região de Aracaju para o dia 18 de fevereiro de 2016, quando foram registradas as maiores diferenças de temperatura. Observa-se na área central da cidade classificada pelas classes LCZ3 e LCZ4 os maiores valores de temperatura variando de 28°C até 31°C, ao passo que, as áreas

periurbanas caracterizadas pelas classes LCZ 6, LCZ7, LCZ9 bem como pelas classes de vegetação LCZA e LCZB apresentaram temperaturas menores variando entre 23°C a 25°C.

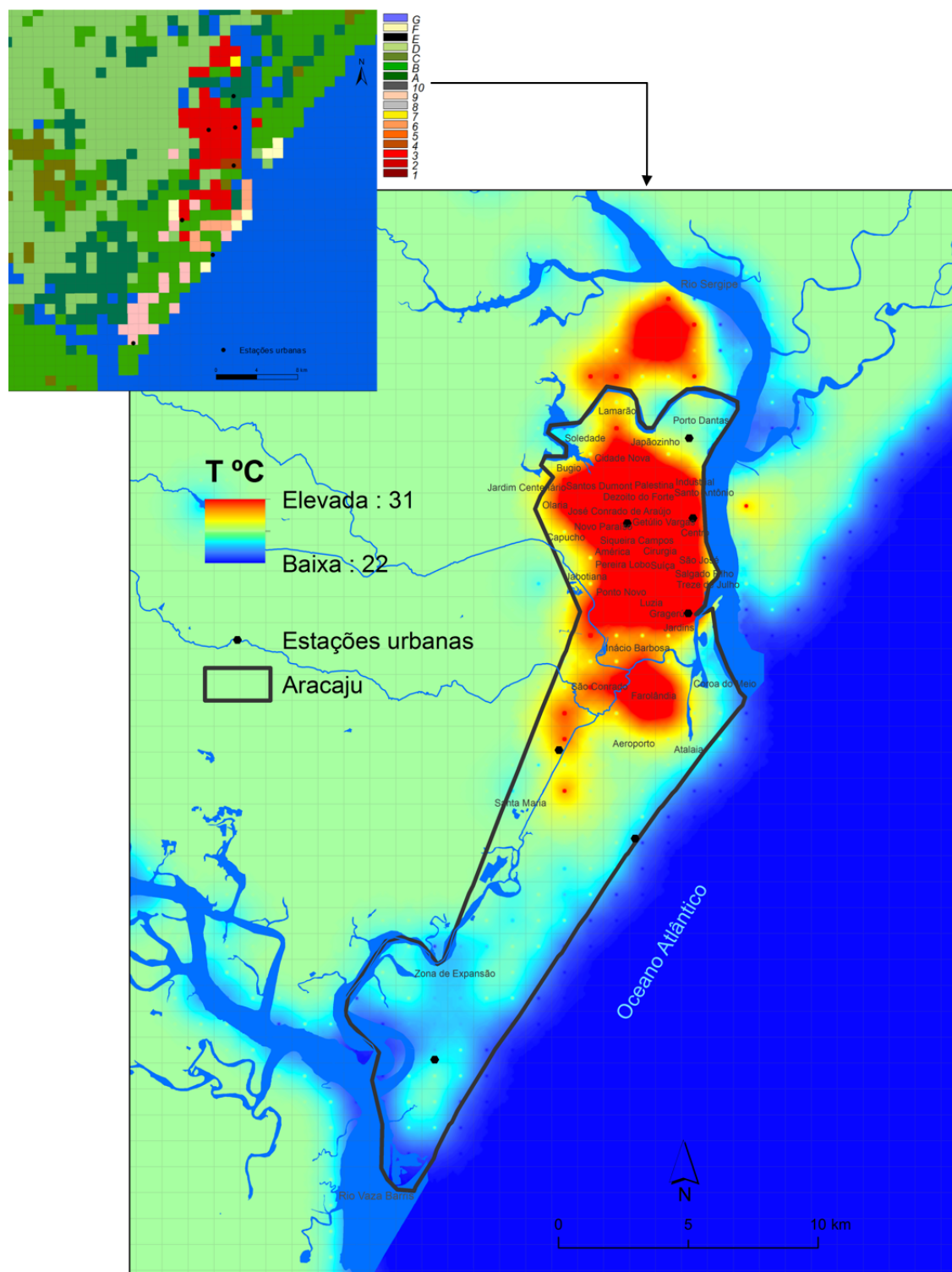


Figura 71: Distribuição da temperatura no dia 18-2-2016 às 1500h em Aracaju baseada na classificação das LCZ.

5.5 Redefinição das LCZs

O segundo procedimento considerado para a incorporação da LCZs no quadro de avaliação do URCH é a redefinição das LCZs. A razão desse procedimento é o fato que o padrão morfológico das LCZ é originário das cidades norte-americanas e européias, o que pode não descrever fielmente os elementos físicos na sua relação espacial. Além disso, as imagens Landsat8 (resolução 30 metros) usadas na elaboração do mapa das LCZs não fornecem, por vezes, uma boa diferenciação de certas LCZs. O refinamento das classes de LCZs tenta reduzir essas limitações levando em conta as características morfológicas próprias da cidade e, uma vez bem redefinidas, informações climáticas mais consistentes podem ser extraídas das LCZs. Cabe ressaltar que, durante o processo de refinamento exigirá, por vezes, o julgamento subjetivo baseado no conhecimento local.

É parte do refinamento separar os parâmetros climáticos oriundos do banco de dados existente na cidade dos parâmetros contidos nos metadados de classificação das LCZs sugerida por Stewart e Oke, (2012) que eventualmente não estão disponíveis. Desse modo, para cada LCZ extraíram-se os valores médios das propriedades FVC, altura média dos edifícios, rugosidade aerodinâmica dos elementos e as taxas percentuais de superfícies impermeável e de superfície permeável. Posteriormente complementou-se às LCZs as propriedades existentes no sistema da LCZs nomeadamente as propriedades admitância da superfície, albedo e fluxo de calor antropogénico (Tabela 25).

Em seguida, algumas classes de LCZ foram suprimidas, de maneira que, restaram somente as LCZs do tipo construído LCZ3, LCZ4, LCZ6, LCZ7 e LCZ9. Apesar de apresentar boa precisão e representação, as LCZF, LCZB, LCZA foram excluídas desta análise, pois são camadas que já fazem parte do quadro das URCH. Como resultado, chega-se a redefinição espacial das LCZs como pode ser visto na Figura 72 e a descrição genérica das LCZs na Tabela 27. Assim, esses resultados relevam que a classificação da LCZ mostra uma concordância satisfatória com os padrões térmicos locais e, portanto, um elemento potencial no quadro de avaliação das URCH.

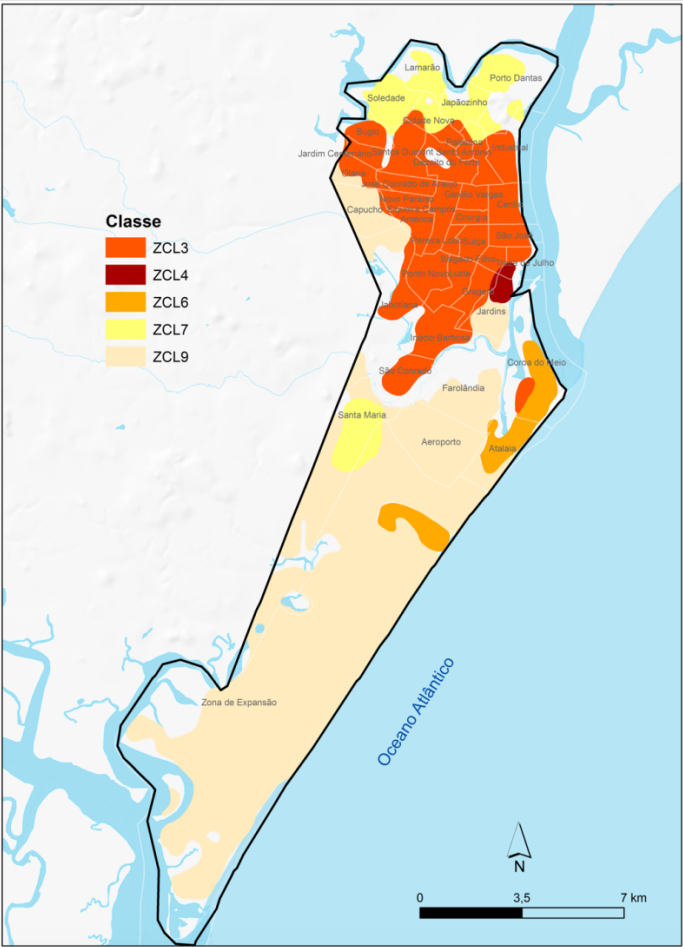


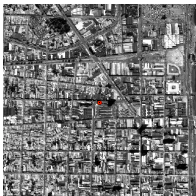

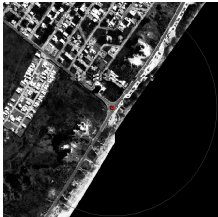


Figura 72: Redefinição das LCZ de Aracaju.

Tabela 25: Parâmetros climáticos das LCZ redefinidas no contexto de Aracaju.

| Classe | Propriedades calculadas | | | | | | | Propriedades complementares (Stewart e Oke, 2012) | | | |
|--------|----------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|---|------------------------|---------------------------------------|
| | Área (km ²) | Ψ_{sky} (0-1) | z_0 (m) | z_H (m) | λ_b (%) | λ_i (%) | λ_v (%) | H/W (0 -3) | μ (j m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹) | α (0.02-0.5) | Q_F (0 - 400 W m ⁻²) |
| LCZ3 | 27.09 | 0.80 | 0.18 | 6 | 63.22 | 91.0 | 16.21 | 0.75-1.5 | 1.200-1.800 | 0.10-0.20 | <75 |
| LCZ4 | 0.64 | 0.46 | 3.12 | 39 | 52.96 | 84.21 | 24.85 | 0.75-1.25 | 1.400-1.800 | 0.12-0.25 | <50 |
| LCZ6 | 5.40 | 0.89 | 0.05 | 3.5 | 42.67 | 54.02 | 26.27 | 0.3-0.75 | 1.200-1.800 | 0.12-0.25 | <25 |
| LCZ7 | 8.83 | 0.95 | 0.38 | 3.0 | 16.02 | 18.45 | 53.28 | 1-2 | 800-1.500 | 0.15-0.35 | <35 |
| LCZ9 | 58.02 | 0.98 | 0.36 | 3.0 | 8.50 | 13.37 | 23.75 | 0.1-0.25 | 1.000-1.800 | 0.12-0.25 | <10 |

Ψ_{sky} - Fator de visão do céu; z_0 - comprimento de rugosidade; z_H - altura média dos elementos rugosos; λ_b - taxa de superfície ocupada por edifícios; λ_i - taxa de superfícies impermeáveis; λ_v - taxa de superfícies permeáveis; μ - admitância da superfície (quociente entre o fluxo de calor e as oscilações de temperatura numa das faces da superfície); α - albedo (razão entre a radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre ela) Q_F - fluxo de calor antrópico.

Tabela 26: Descrição genérica das LCZs redefinidas em Aracaju.

| Classe | Descrição genérica complementada* | Foto aérea |
|--------|--|---|
| LCZ3 | Ocupação compacta e edificações baixas Mistura compacta de edifícios médios (3 a 6 pavimentos) e edifícios altos (+10 pavimentos) isolados. Cobertura do solo pavimentada por asfalto e concreto. Pouca presença de vegetação (concentradas nas vias e praças). Demanda moderada de aquecimento residencial. Fluxo de tráfego de veículos de moderado a elevado. Função residencial, comercial e de serviços. |  |
| LCZ4 | Ocupação aberta e edificações elevadas Mistura aberta de edifícios altos (+10 pavimentos) e espaçados por edifícios médios (3 a 6). Cobertura do solo pavimentada por asfalto e concreto. Pouca ou nenhuma vegetação (exceto às margens do rio Sergipe). Fluxo de tráfego de veículos de moderado a baixo. Função residencial. |  |
| LCZ6 | Ocupação aberta e edificações baixas Aglomerado de edifícios relativamente espaçados com até 3 pavimentos e com edifícios médios isolados. Cobertura do solo pavimentada (asfalto e concreto) e de superfícies permeáveis (vegetação, areia e solo expostos). Presença considerável de vegetação. Fluxo de tráfego de veículos baixo. Função residencial. Forte influência de corpos d'água. |  |
| LCZ7 | Ocupação desordenada e edificações baixas Mistura densa de baixos edifícios (3 pavimentos). Cobertura de superfícies permeáveis (vegetação e solo expostos) e alguma presença de superfície pavimentada (asfalto e concreto). Pouca presença de árvores. Fluxo de tráfego de veículos baixo. Função residencial. |  |
| LCZ9 | Aglomerado urbano espaçado com áreas agrícolas. Aglomerado de edifícios espaçados com até 3 pavimentos. Forte presença da vegetação. Cobertura de superfícies permeáveis. Fluxo de tráfego de veículos baixo. Função residencial e áreas agrícolas. |  |

* Suplemento “Datasheets for Local Climate Zones” referente a “Local Climate Zones for Urban Temperature Studies” (Stewart e Oke, 2012).

6 Informações adicionais sobre o conforto térmico, poluição do ar e frente de brisa marítima

Para complementar a avaliação teórica e qualitativa, foram agregadas, às URCH, informações climáticas sobre as áreas críticas no que concerne ao estresse térmico e à poluição do ar. Em relação ao primeiro aspecto, foram considerados os resultados da espacialização dos valores do PET no mapa bioclimático do capítulo 4. Dele, foram extraídos os locais com maior probabilidade de ocorrência de estresse térmico por excesso de calor considerando os valores do PET $>34^{\circ}\text{C}$. Associado ao estresse térmico, incluiu a informação sobre a frente de brisa marítima notadamente o avanço médio horário das isócronas no mês dezembro. Foi comprovado no capítulo 1 que há um aumento do estresse térmico logo após a passagem da frente de brisa marítima. Quanto à informação sobre a poluição do ar, utilizou-se o mapa das concentrações de MP_{10} referente ao pico de fluxo de veículo da manhã simulado nas principais vias de circulação da cidade (capítulo 5).

7 Mapa final das Unidades de Resposta Climática Homogênea (URCH) analisado com as LCZs

Como resultado do cruzamento das camadas “morfologia urbana” e “classes de ventilação” chegou-se ao mapa das URCH de Aracaju com a resolução de 100m x 100m, tendo nele a camada das LCZs agregada. O mapa das URCH de Aracaju mostra as áreas de “climas especiais” onde se deve ter atenção especial no que concerne ao nível de estresse térmico e à poluição do ar. Cada uma das URCH, que seguidamente se descrevem, corresponde a grupos de “unidades” (ou climatopos) que, para simplificar, são denominados por URCH (Figura 73 e Tabela 27).

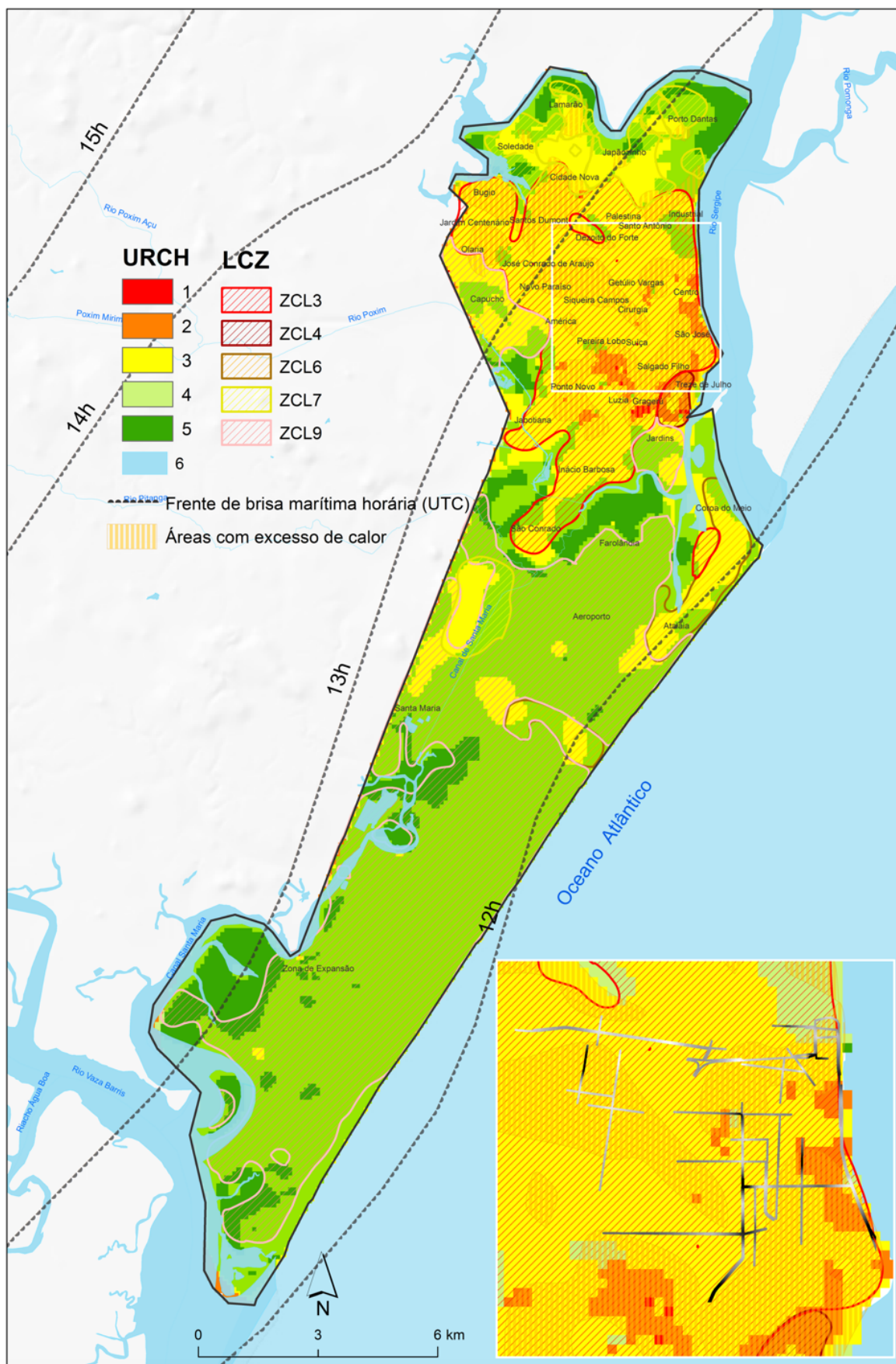


Figura 73: URCH de Aracaju com a resolução 100m x 100m.

Tabela 27: Legenda das URCH de Aracaju.

| Morfologia Urbana | | Classes de ventilação (potencial) | | | Local Climate Zones | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------|---------------------------|---------------------|------|------|------|------|
| | | Baixo | Médio | Elevado (espaços abertos) | LCZ3 | LCZ4 | LCZ7 | LCZ6 | LCZ9 |
| Ocupação urbana com densidade | Elevada | 1 | | | | | | | |
| | Média | 2 | | | | | | | |
| | Baixa | | 3 | | | | | | |
| Espaços verdes | Ocupação agrícola, vegetação herbácea | | 4 | | | | | | |
| | Manchas florestais e parques urbanos | | 5 | | | | | | |
| Corpos d'água | (Influência do mar e rio) | | | 6 | | | | | |

7.1 Caracterização das URCH

URCH1. Compreende as *áreas construídas de elevada densidade com baixo potencial de ventilação urbana*, onde o efeito térmico é elevado e a velocidade média do vento sofre uma redução considerável. Como resultado, é esperada uma elevada probabilidade de ocorrer estresse térmico, pois o comportamento térmico é caracterizado por sensação de *calor* e níveis de estresse fisiológico de *calor moderado* (valor médio do PET de 32°C). A pouca (ou ausência) de vegetação e a verticalização elevada são as marcas dessa URCH1. As atividades humanas são intensas na produção de calor e poluentes de tráfego de veículos. A URCH1 corresponde à LCZ4 e pode ser encontrada na parte central da cidade, bairro Jardins (Figura 74).



Figura 74: Exemplo da URCH1

Crédito: Jorge Henrique.

<http://sergipeemfotos.blogspot.pt/2015/04/imagens-aereas-da-cidade-de-aracaju.html>

Acesso em 25 de mar. 2017

URCH2. Compreende as *áreas construídas de média densidade com médio a baixo potencial de ventilação urbana* e onde o efeito térmico é relativamente moderado. Potencialmente apresenta uma redução moderada na velocidade média do vento, exceto nos locais estreitos como as vias expostas à canalização dos ventos. Impacto moderado sobre o estresse térmico, pois o comportamento térmico é caracterizado por sensação de *calor* e níveis de estresse fisiológico de *calor moderado* (valor médio do PET de 31°C). As atividades humanas são relativamente intensas na produção de calor e poluentes de tráfego de veículos. A URCH2 corresponde à LCZ3 e compreende aos bairros centrais e norte da cidade (Figura 75).



Figura 75: Exemplo da URCH2.

Fonte: http://sergipeemfotos.blogspot.pt/2014/03/vista-aerea-da-cidade-de-aracaju_2.html. Acesso em 25 de mar. 2017

URCH3. Compreende as *áreas construídas de baixa densidade com médio a elevado potencial de ventilação urbana* e onde o efeito térmico é relativamente baixo e o predomínio de boa ventilação. Aqui, os espaços abertos potencializam a atuação dos corredores de ar. Todavia, é possível que o estresse térmico forte ocorra nalguns locais devido à exposição a alta radiação solar. O comportamento térmico é caracterizado por sensação de *calor* e níveis de estresse fisiológico de *calor moderado* (valor médio do PET de 30.5°C). Nesta URCH3, as atividades humanas são intensas na produção de calor e poluentes de tráfego de automóveis. A URCH3 corresponde às LCZ3, LCZ7 e parcialmente às LCZ6 e LCZ9. A URCH3 pode ser encontrada principalmente nos bairros da Zona Central, e áreas a norte e sul da cidade (Figura 76).



Figura 76: Exemplo da URCH3

Fonte: Márcio Dantas, <http://www.aracaju.se.gov.br/index.php?act=leitura&codigo=40098>. Acesso em 25 de mar. 2017

URCH4. Compreende as áreas de espaços verdes com *predomínio de vegetação herbácea, arbustos isolados e ocupação agrícola* e onde o efeito térmico é baixo e a ventilação urbana é ótima, pois os corredores de ventilação são naturalmente ativos. O comportamento térmico é caracterizado por sensação de *calor* e nível de estresse fisiológico pode chegar até *calor moderado* (valor médio do PET de 29.5°C) devido à alta exposição à radiação solar. Nesta URCH4, as atividades humanas são relativamente reduzidas na produção de calor e poluentes de tráfego de automóveis. A URCH4 corresponde à LCZ9 e parcialmente à LCZ6 e pode ser encontrada principalmente na Zona de Expansão a sul da cidade (Figura 77).



Figura 77: Exemplo da URCH5

Fonte: Arquivo João Manoel/skyscrapercity.com. Acesso em 25 de mar. 2017

URCH5. Corresponde aos espaços verdes com *manchas florestadas e parques urbanos* onde o efeito térmico é baixo devido à presença da vegetação (sombreamento e evapotranspiração). A depender da densidade da vegetação, as manchas florestais podem ter valores de rugosidade aerodinâmica consideráveis, pelo que alguns corredores de ventilação podem sofrer uma redução média da velocidade do vento junto à superfície. O comportamento térmico é caracterizado por sensação *confortável* e nível *sem estresse fisiológico* (valor médio do PET de 28°C). Fundamentalmente a URCH5 desempenha um papel importante na redução dos níveis de estresse térmico e na melhoria da qualidade do ar através da filtragem de poluentes atmosféricos. Nesta URCH5, a espécie arbórea predominante é o mangue ladeado pelos córregos em vários locais da cidade. Soma-se a ela, espécies oriundas da Mata Atlântica concentradas na reserva floresta do Parque da Cidade e, em menor quantidade, nas praças urbanas. A URCH5 corresponde à LCZA (Figura 78).



Figura 78: Exemplo da URCH4

Fonte: <http://www.atlanticahotels.com.br/hotel/aracaju/go-inn-aracaju>. Acesso em 25 de mar. 2017

URCH6. Corresponde aos *corpos d'agua* os quais se atribuem a função reguladora dos climas locais quer pelo armazenamento do calor diurno quer na produção de ar fresco via a canalização dos ventos úmidos do mar. A URCH6 constitui os corredores de ventilação livres de natureza úmida e fresca. Além disso, ela desempenha um papel mútuo na proteção de vários ecossistemas fluviais e marinhos importantes na cidade, a exemplo do manguezal. A URCH6 corresponde à LCZF (Figura 79).



Figura 79: Exemplo da URCH5
Crédito: Cortesia de André Moreira.

Capítulo 7: Estudos microclimáticos na área central da cidade

1 Introdução

Baseado no mapa da URCH previamente definido no capítulo 6, realizaram-se dois estudos microclimáticos na área central da cidade onde predomina as URCH1, URCH2, as áreas com excesso de calor e as vias com elevadas concentrações de PM_{10} (Figura 80). Aqui, pretende-se buscar à microescala, medidas que possam ajudar na definição das medidas mesoclimáticas. O primeiro estudo dedica-se à análise da influência da geometria urbana e vegetação na temperatura, umidade relativa e ventos, usando modelo ENVI-met. O segundo estudo subdivide-se em (i) efetuar novas simulações com modelo CAL3QHC a fim de propor medidas que reduzam os níveis de concentração de MP_{10} identificados nas vias de circulação e (ii) avaliar o potencial de remoção de poluentes atmosféricos através das árvores usando o software *I-tree Canopy*, ambos realizados na área que compreende o Mercado Municipal (Figura 80).

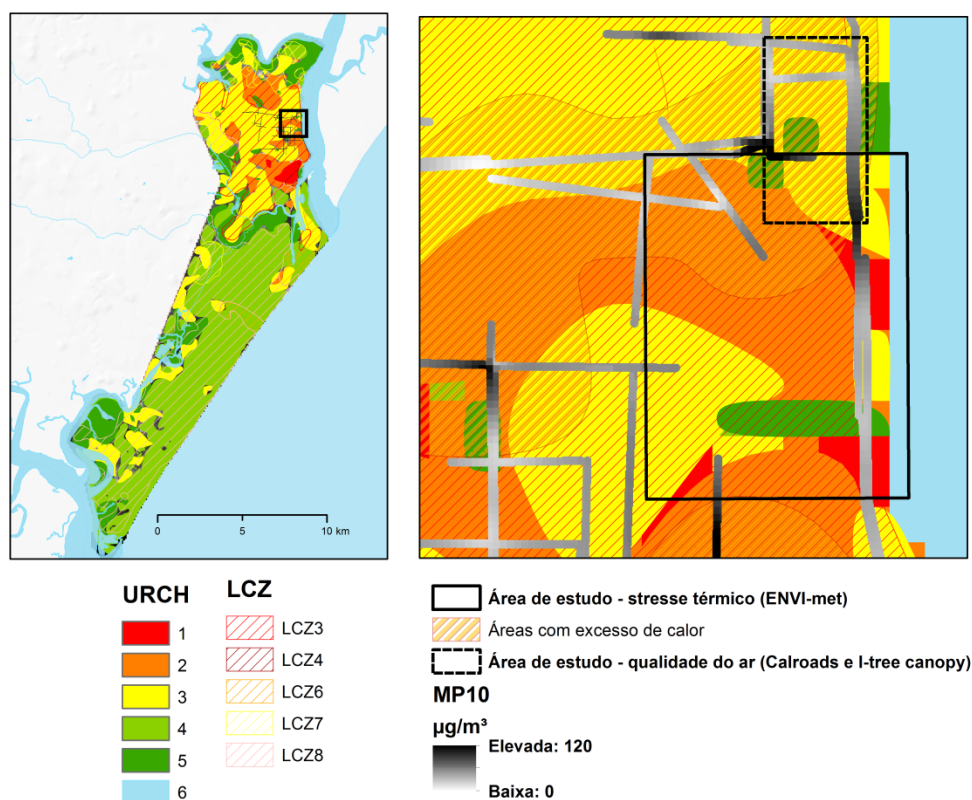


Figura 80: Estudos microclimáticos no centro da cidade sobre o estresse térmico e a qualidade do ar baseados nas URCH.

2 Estudo 1: influência da geometria urbana nas condições climáticas

2.1 Aplicação do modelo microclimático ENVI-met

O ENVI-met 4.0, usado na simulação, é um modelo prognóstico, tridimensional e de alta resolução disponível no site (<http://www.envi-met.com/>). Ele é capaz de calcular o balanço de energias e as variáveis microclimáticas tais como o campo de vento tridimensional, turbulência, temperatura do ar e umidade relativa do ar, fluxos radiativos e dispersão de poluentes, baseando-se nos princípios da mecânica de fluidos, termodinâmica e das leis físicas da atmosfera (Bruse, 1998; Bruse 2004).

A área modelada esteve em conformidade com as características e compatibilidades do ENVI-met. Ela cobriu uma área de 112m x 116m x 40m e foi digitalizada numa resolução de 5m, de modo que, as diferentes geometrias (*canyons* urbanos - H/W, FVC), propriedades físicas (edificado, árvore, corpos d'água) e superfícies impermeáveis (asfáltica e concreto) pudessem ser replicadas fielmente (Figura 81). A resolução espacial do modelo varia entre 0.5 a 10 m e o tempo simulado normalmente cobre de 24 horas a 5 dias. O tamanho máximo da área simulada do modelo é de uma grade composta por 250x250 células horizontalmente e 30 células verticalmente, onde objetos como edifícios e vegetação podem ser modelados diretamente sem a necessidade de parametrização (Bruse, 1998).

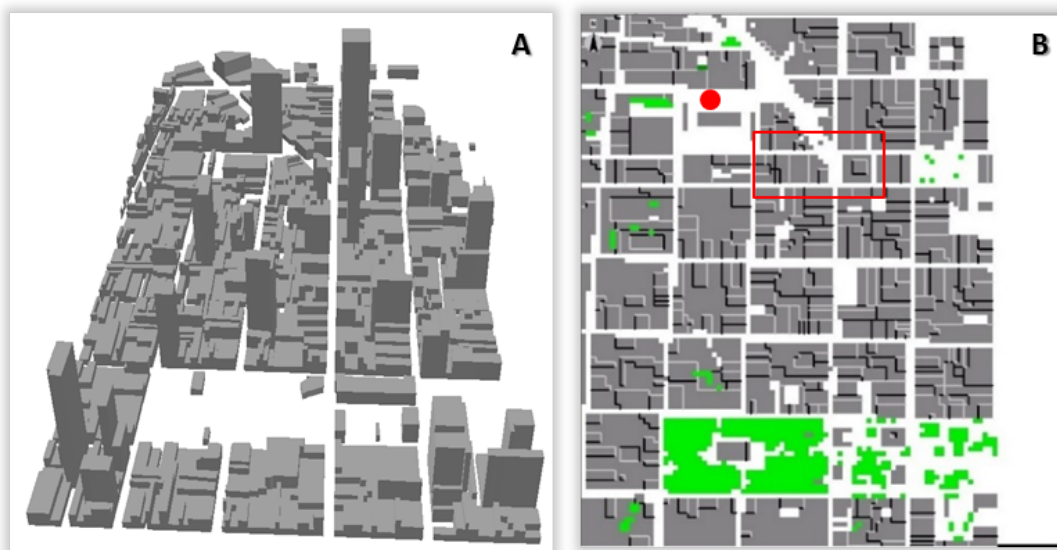


Figura 81: Fragmento do centro da cidade selecionado para a modelação microclimática com o ENVI-met.

Nota: À esquerda, a imagem 3D dos edifícios e, à direita, a edição do uso do solo (edifícios e vegetação). O círculo vermelho dentro da área do modelo corresponde a estação urbana (CC) utilizada para a validação do modelo e o retângulo vermelho é área teste de outra simulação para avaliar a aplicação de uma estratégia verde.

A situação simulada pelo modelo condiz com as condições meteorológicas para um dia típico de verão com a presença da frente de brisa, selecionando a hora que expressasse geralmente as situações críticas de estresse térmico (18-2-2016 às 1500h). Assim, derivaram-se desse dia os dados de entrada no modelo que incluem as de temperatura (T_{ar}), umidade relativa do ar (UR - à 2 m de altura) e velocidade do vento (v - a 10m), ambas obtidas da estação meteorológica automática INMET. Foram incluídos também os valores de referência de temperatura potencial (K) e umidade específica (g/kg) a 2500 m de altitude, calculados a partir de sondagem aerológica, disponibilizados pela Universidade de Wyoming, EUA¹⁸. Como Aracaju não dispõe desse tipo de sondagem, foi necessário utilizar dados de uma estação meteorológica mais próxima da área de estudo, nomeadamente a da cidade de Salvador localizada a uma distância de 320 km. Os principais dados de entrada empregues na simulação estão sintetizados na tabela 29.

Tabela 28: Principais dados de entrada no modelo ENVI-met.

| Principais dados de entrada no modelo |
|--|
| Dia do início da simulação = 17-02-2016 |
| Horário do início da simulação = 21h |
| Total de horas de simulação = 24h |
| Velocidade do vento a 10 m da superfície [$m\ s^{-1}$] = 3.5 |
| Direção do vento = 90 (Leste) |
| Comprimento de rugosidade = 0.1 |
| Temperatura do ar inicial (K) = 304.0 |
| Umidade específica em 2500 m (g /kg) = 7.0 |
| Umidade relativa em 2m (%) = 55 |

2.2 Processo de obtenção do modelo validado

O ENVI-met utiliza um modelo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e, como tal, a sua precisão ou grau de concordância com a realidade interpretada é importante de ser avaliada para validar as informações climáticas advindas de sua utilização. O manual do usuário do ENVI-met (2016) é claro ao afirmar que só pode ser calculado se os dados microclimáticos usados no modelo estão corretos e fazem sentido com a condição ambiental local. Assim sendo, a validação do ENVI-met foi realizada neste estudo mediante a comparação

¹⁸ <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

entre os dados de T_{ar} semi-horários da estação urbana Centro da Cidade, localizada dentro da área modelo, com os dados meteorológicos (*output*) gerados pelo próprio modelo. A avaliação do conforto térmico é consequência das disposições das variáveis T_{ar} , UR e v no ambiente térmico urbano; todavia, neste estudo apenas a comparação da T_{ar} foi considerada como critério de validação do modelo. Desse modo, a correlação por meio de uma regressão linear simples entre a T_{ar} medida e a simulada com o ENVI-met foi considerada para verificar se o modelo representa fielmente as condições ambientais da realidade local. Uma vez validado o modelo, foram construídos cenários com o objetivo de avaliar medidas mitigadoras para reduzir o estresse térmico por excesso de calor.

O resultado da validação do modelo ENVI-met mostrou, através da análise de regressão linear, que a T_{ar} estimada pelo modelo obteve numa boa aproximação com a T_{ar} medida pela estação Centro da Cidade, pois foi encontrada uma forte correlação (coeficiente de correlação $r^2 = 0,947$) (Figura 82). Esses resultados revelam que a T_{ar} calculada pelo ENVI-met está bem correlacionada com a medida em campo, considerado o modelo razoavelmente confiável para representar as condições microclimáticas em Aracaju.

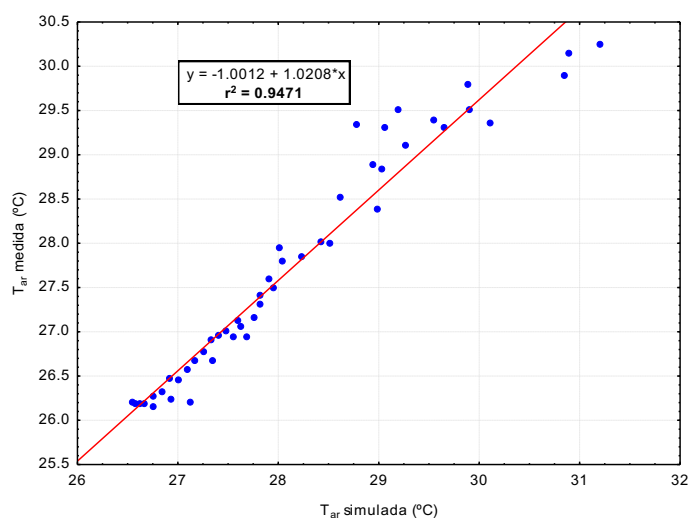


Figura 82: Correlação entre a T_{ar} simulada com ENVI-met a 1.5 metros acima do solo e a T_a medida pela estação urbana Centro da Cidade a 3.5 metros acima do solo referente aos dados semi-horários no dia 18-2-2016.

Considerando o bom desempenho do modelo ENVI-met, diferentes cenários foram modelados a fim de avaliar a condição atual e especialmente prever a influência dos elementos físicos (espaços verdes e edifícios) no conforto térmico. Todos os mapas foram criados usando o software LEONARDO embutido no ENVI-met, no qual a área base dos edifícios são mostradas com a cor preta e os resultados das variáveis simuladas são mostradas no intervalo de cores.

2.3 Resultados

A simulação com o modelo ENVI-met mostrou que a variação espacial da T_{ar} , UR, v foram significativas num fragmento do centro de Aracaju. A T_{ar} apresentou uma variação entre 28.3 a 31.2°C, a UR com entre 56-76% e a v entre 0 - 3.9 ms⁻¹. No interior da área modelada (Av 7 de Setembro, Rodoviária, Rua São Cristóvão) encontram-se os maiores valores de T_{ar} simulados com 31.2°C, em contraste com os valores observados ao longo da Avenida Rio Branco (próximos de 29.5°C) (Figura 83). Esta área encontra-se à barlavento sem obstáculos e recebe a boa ventilação proveniente do rio Sergipe, onde foram registrados nas suas margens, os maiores valores de UR acima de 74% (Figura 84). Outra área de contraste térmico encontra-se a sul da área (Praças Olímpio Campos e Almirante Barroso) onde existe uma alta densidade de vegetação. Ali, além de valores expressivos de UR (acima de 70%), verificaram-se valores baixos de T_{ar} com a redução de até 2°C em relação a área construída envolvente. O efeito refrescante das árvores devido ao sombreamento (também dos edifícios) e a evapotranspiração parecem explicar as T_{ar} mais baixas simuladas nessa área. No interior da área do modelo foi observada uma diminuição média nos valores v , onde as áreas mais ventiladas foram encontradas nas margens do rio Sergipe com máximos de 3.9 ms⁻¹, o que pode explicar as T_{ar} ao redor de 29°C. Adicionalmente, as ruas orientadas no sentido Oeste-Leste foram lagamente beneficiadas com o aumento da v devido à canalização dos ventos, configurando o chamado efeito *venturi* (Figura 85). Todavia, nalgumas áreas com vegetação verificou a redução nos valores de v até 2 ms⁻¹.

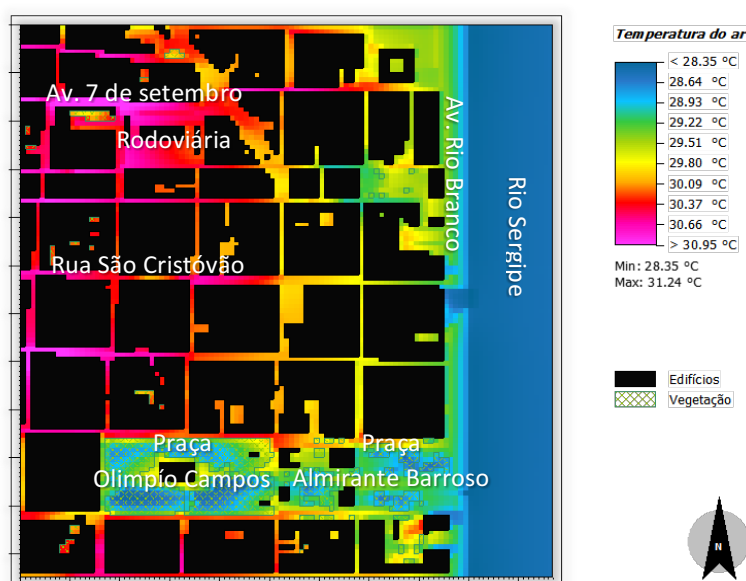


Figura 83: T_{ar} simulada a altura de 1.5 metros acima do solo com o ENVI-met num fragmento do centro urbano de Aracaju no dia 18-2-2016 às 1500h.

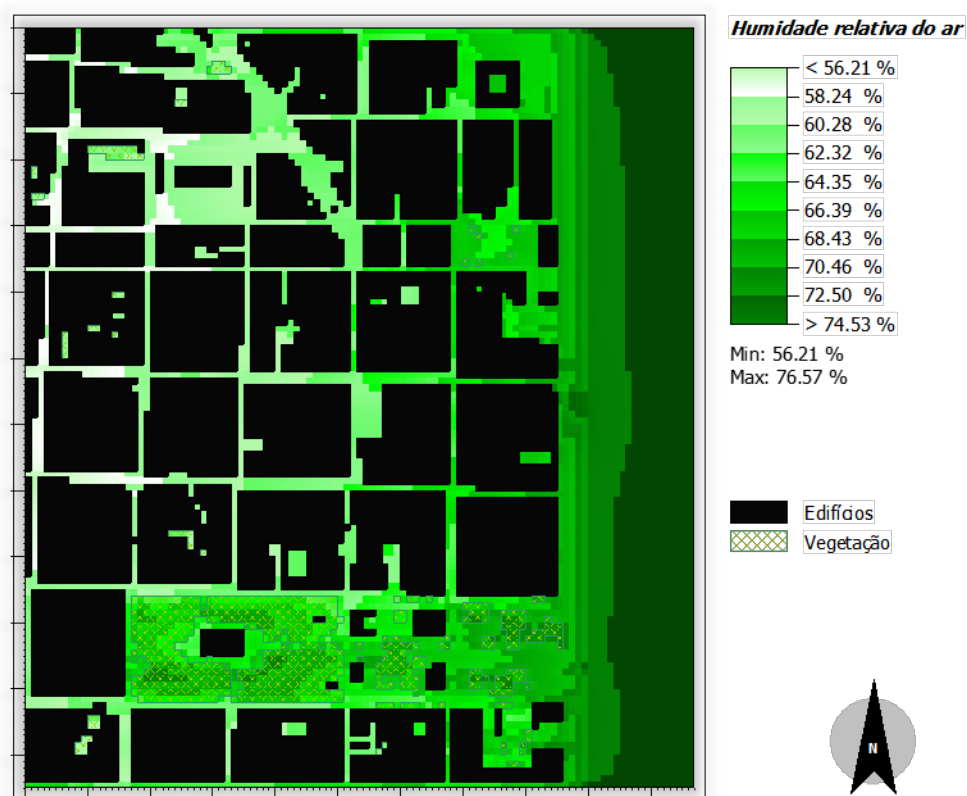


Figura 84: UR simulada a altura de 1.5 metros acima do solo com o ENVI-met num fragmento do centro urbano de Aracaju no dia 18-2-2016 às 1500h.

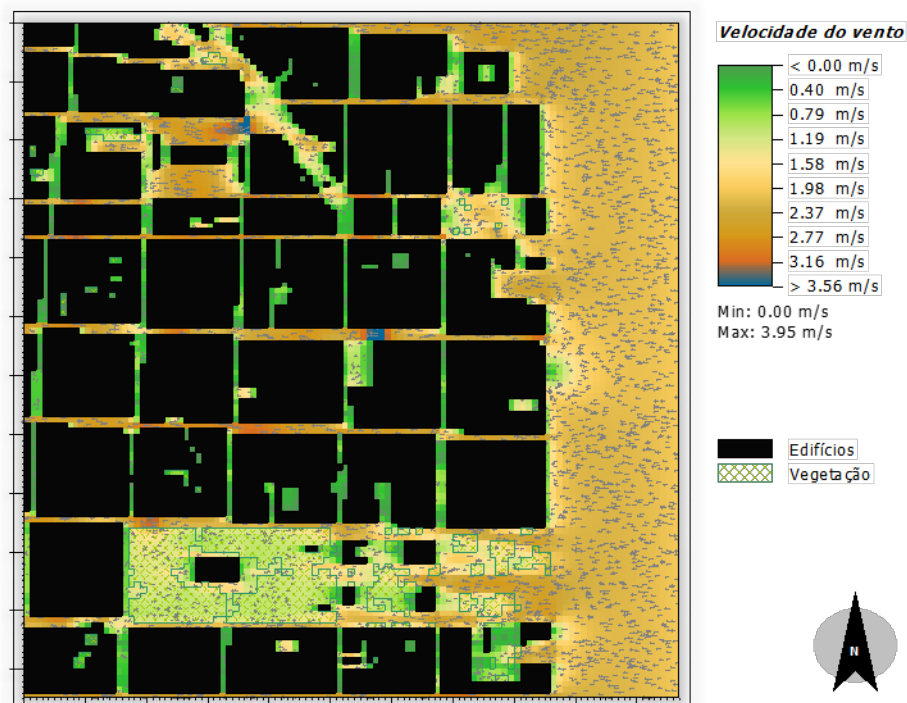


Figura 85: v simulada a altura de 1.5 metros acima do solo com o ENVI-met num fragmento do centro urbano de Aracaju no dia 18-2-2016 às 1500h.

2.4 Cenário para avaliar o potencial das árvores na redução da temperatura

Confrontou-se o cenário atual das condições microclimáticas com um hipotético a fim de avaliar o potencial efeito refrescante da vegetação no ambiente urbano. Optou-se por selecionar outra área menor dentro da área modelada anteriormente onde as intervenções urbanísticas de natureza verde seriam mais limitadas devido à estrutura física (edifícios) e concentrada (ver figura 87). A nova área simulada com 2.992 m² corresponde ao tamanho do domínio no modelo de 157.50 m x 66.5 m e com resolução de 3.5m que corresponde a largura média estimada das calçadas.

A situação atual foi representada por 1.116 m² de edifícios que equivale a 37% da área total modelada e sem vegetação (Figura 86(a)). A estratégia “verde” adotada num cenário hipotético consistiu em adicionar árvores nas calçadas e ao redor dos edifícios cobrindo 38.6% da área modelada (1.155 m²) (Figura 86(b)). As variáveis usadas na comparação foram a T_{ar} e a temperatura radiativa média (T_{trm} -°C) por serem potenciais indicativos na avaliação do conforto térmico local (capítulo 4). As configurações de entrada no modelo seguiram as mesmas usadas na simulação anterior (ver tabela 29).

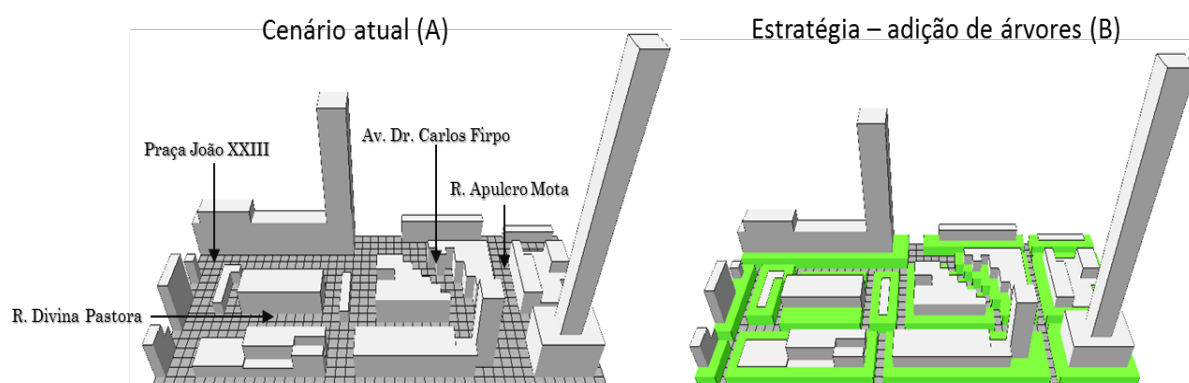


Figura 86: Visão 3D de um recorte espacial nas imediações da rodoviária no centro de Aracaju. São mostrados o cenário atual (A) e o cenário hipotético estratégico com adição de árvores nas vias (B).

O tipo de árvore usado na nova simulação foi a *Pithecellobium dulce* (mata-fome) considerada como uma das mais comuns e generalizada espécie na arborização urbana de Aracaju. O mata-fome atinge uma altura de cerca de 10 a 15 metros e a média do diâmetro da copa de 12 metros que, devido à sua folhagem e copa, essa espécie é utilizada frequentemente nas principais vias e praças públicas da cidade (Santos et. al. 2011; Souza et. al., 2011; Neto e Souza, 2011; Souza, 2011). Essa espécie de vegetação foi parametrizada com as medições LAD (Densidade de Área Foliar) considerando o estágio vegetativo

maduro (10 metros). Essas informações foram adicionadas à base de dados *3D plants* do ENVI-met para representar as características das copas e para aplicações futuras.

Os resultados da simulação mostraram que a estratégia “verde” de adicionar 38.6% de árvores na área do modelo significou uma redução até 1°C na T_{ar} e até 20°C na T_{trm} , quando comparadas com o cenário atual (Figura 87). Esse cálculo está em concordância com os 30% de espaços verdes sugeridos por Lombardo (1985) para reduzir os efeitos da ICU em São Paulo. Esses resultados reafirmam a importância das árvores na redução da temperatura intraurbana e, portanto, constitui medida mitigadora eficaz frente ao excesso de calor no ambiente urbano.

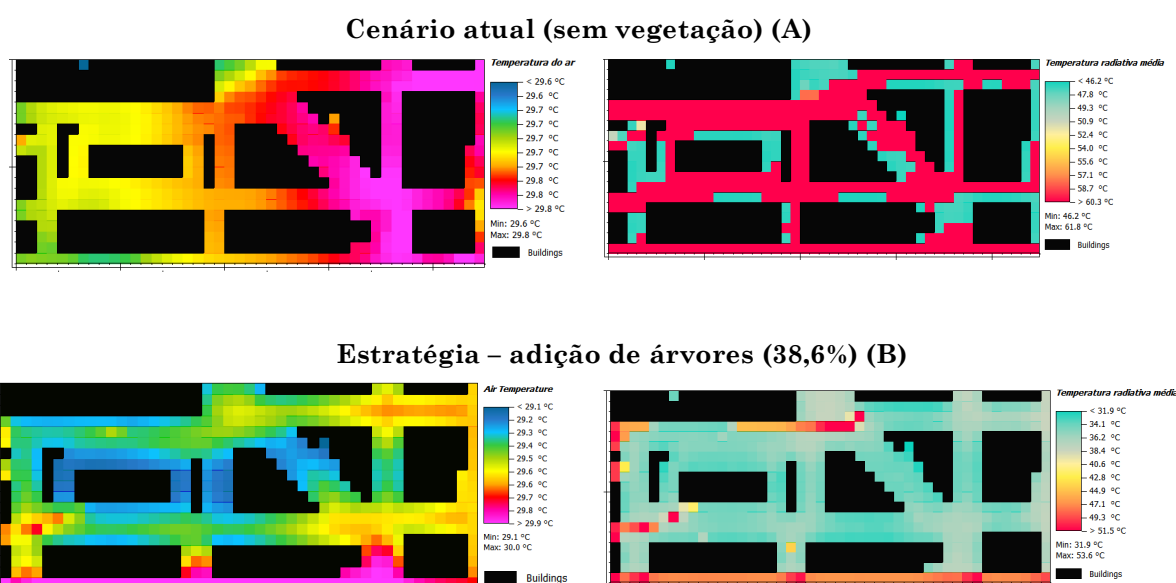


Figura 87: Simulação comparativa da T_{ar} (à esquerda) e T_{trm} (à direita) entre o cenário atual e o cenário hipotético com adição de árvores, usando o modelo ENVI-met.

3 Estudo 2: medidas de redução da poluição do ar nas vias de circulação

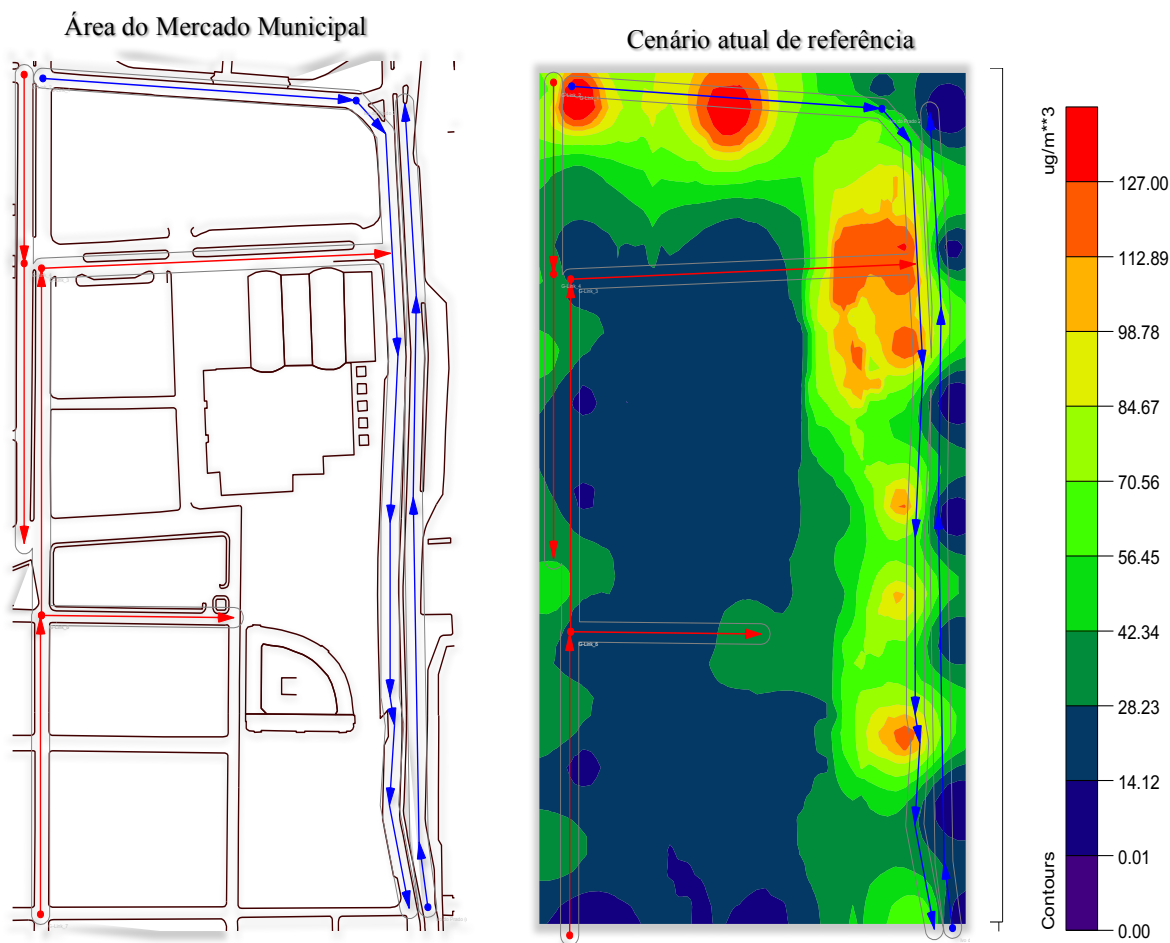
3.1 Aplicação do modelo CAL3QHC

Baseado nas simulações do modelo CAL3QHC, foram propostos diferentes cenários hipotéticos de redução dos níveis de concentração de PM_{10} através da redução do tráfego de automóveis. O objetivo é sair da condição *inadequada* do ar ($120 \mu g m^{-3}$) e alcançar a condição de boa qualidade do ar (até $50 \mu g m^{-3}$). Para esta finalidade, os procedimentos e dados de entrada da simulação do período da manhã foram apresentados no capítulo 5, a exceção

obviamente do número de automóveis que seguiu o critério de redução do número de automóveis nas vias previamente selecionadas.

3.2 Resultados

Os resultados obtidos com a nova simulação mostraram que, no cenário de redução de 30% de automóveis houve uma diminuição de $127 \mu\text{g m}^{-3}$ para $85 \mu\text{g m}^{-3}$ as concentrações máximas de MP_{10} na área do Mercado Municipal. No cenário de redução de 60% o número de automóveis, as concentrações de MP_{10} diminuíram para $56 \mu\text{g m}^{-3}$, atingindo os limiares aceitáveis de boa qualidade do ar nas cidades brasileiras (Figura 88). A redução do número de automóveis próximo da metade verificada neste estudo está em concordância com estudo de Lopes (2015) na cidade de Funchal (Portugal), em que os dados do modelo CAL3QHC foram validados com os de uma estação de tráfego que monitora as fontes móveis de MP_{10} .



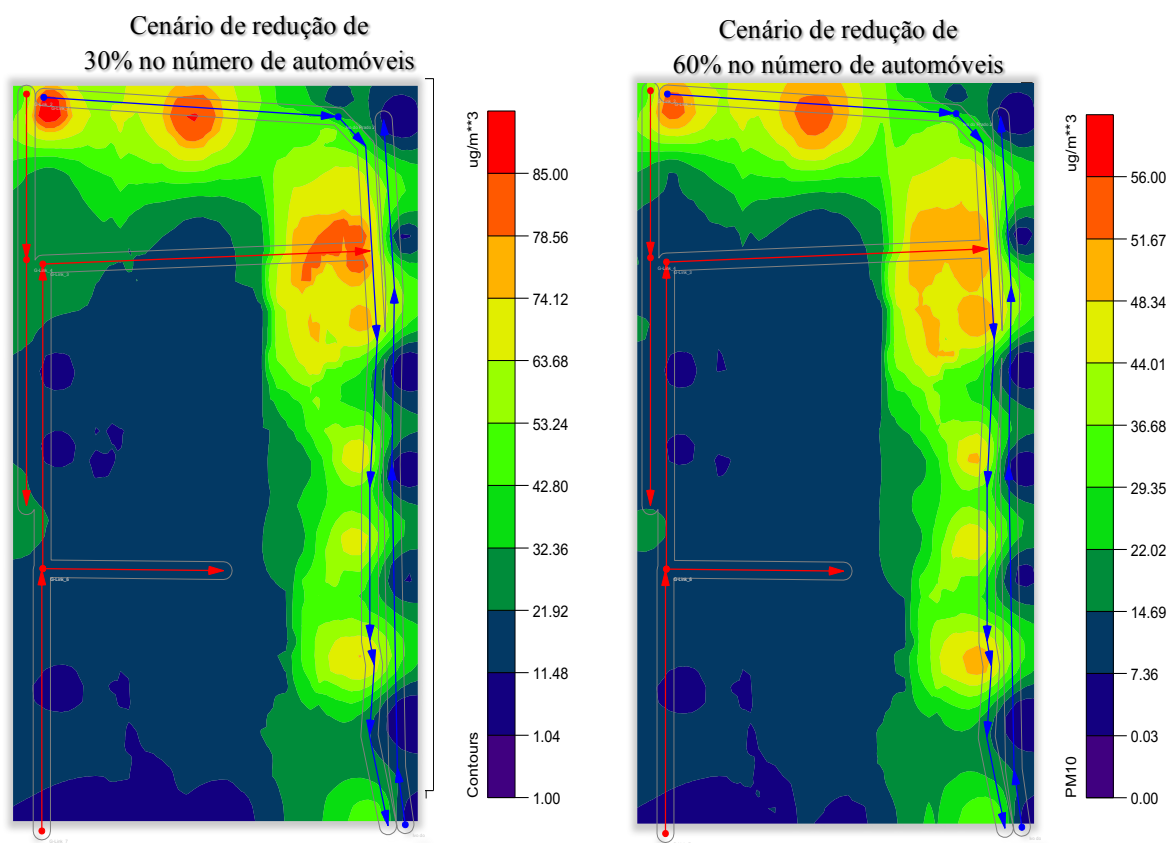


Figura 88: Simulações de cenários hipotéticos das concentrações de MP₁₀ baseados na redução do número de automóvel nas principais vias do Mercado Municipal em Aracaju.

3.3 Aplicação da ferramenta I-tree canopy

O foco foi avaliar a capacidade das árvores na remoção de MP₁₀ e seu custo econômico associado na área do Mercado Municipal. Para essa finalidade, aplicou-se o software *I-Tree Canopy* que estima a cobertura de copas das árvores e seu potencial benefício na qualidade do ar. *Canopy* é parte de um conjunto de ferramentas chamadas de I-Tree¹⁹ desenvolvidas pelo Serviço Florestal Americano que tem, entre outros, o objectivo de avaliar os serviços ecossistêmicos fornecidos pela floresta urbana. A utilização do *Canopy* neste estudo partiu de um treinamento com um dos idealizadores do I-Tree, o Prof. David Nowak, na ocasião do Workshop sobre Florestas Urbanas realizado em 2015 na *University College Dublin* – Irlanda.

O *Canopy* é uma ferramenta online²⁰ que permite estimar a cobertura de árvores e outras classes de uso do solo através da ligação com a imagem do

¹⁹ <https://www.itreetools.org/>

²⁰ <https://canopy.itreetools.org/>

Google Maps da área selecionada. Foram criados pontos aleatórios (*rondam points*) sobre a imagem de satélite, de maneira que, que cada um dos pontos associou a classe correspondente. As classes do solo usadas neste estudo foram *árvore, relva, edificado, ruas, outras superfícies impermeáveis* (estacionamento, concreto e outras). Uma amostra de 3.000 pontos que equivale a uma densidade de 25 pontos por hectare (100 m²) foi usada para obter uma melhor estimativa do modelo. Essa amostra de pontos é relativamente grande e consistente com área de estudo, pois quanto maior o número de pontos menor a margem de erro da estimativa. O erro padrão (σ_p) da estimativa de uma classe selecionada (p) é dado por²¹:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{[p(1-p)]}{N}}, p = n/N \quad (17)$$

onde N representa o número de pontos aleatórios (3.000) e n o número de pontos que corresponde a classe de uso do solo. Assim, uma vez estimada a taxa de cobertura das árvores, os benefícios das árvores podem ser estimados especialmente o potencial de remoção de MP₁₀ e o valor monetário compensatório desse benefício.

O *Canopy* opera a partir da estrutura existente das árvores - número, tamanho, composição - que gera uma função/benefício que, por sua vez, tem-se um valor agregado. O valor depende das características da árvore e da avaliação da árvore por especialistas e, pela sua natureza econômica, constitui uma informação crucial na tomada de decisão. Além disso, a estimativa do potencial de remoção do *Canopy* é baseada em multiplicadores derivados de extensas investigações levadas a cabo sobre as florestas urbanas e a qualidade do ar nos E.U.A. Assim, os benefícios foram estimados através da percentagem de cobertura da área com árvores usando o seguinte multiplicador em g m² ano⁻¹ de 2.375 e R\$/tonelada/ano de 23,252.00 referente ao poluente MP₁₀.

3.4 Resultados

A Figura 89 mostra 97 espécies quantificadas na área do Mercado Municipal com uso do *Canopy* o que representa apenas 5% da área total coberta de árvores. A Figura 89 também mostra o predomínio da classe *edificado* com 34% seguido de *superfícies impermeáveis* com 33% e da *vias* com 23%. Se levarmo-nos em consideração a cobertura vegetal (árvore e relva) o

²¹ https://canopy.itreetools.org/resources/iTree_Canopy_Methodology.pdf

valor não ultrapassa os 9%, indicando um baixo potencial de remoção de poluentes atmosféricos.

A Tabela 29 apresenta o potencial de remoção de MP_{10} ($kg\ ano^{-1}$) fornecido pela quantidade de árvores existentes na área do Mercado Municipal, em que apresenta a taxa de remoção de 16.8kg de MP_{10} anual com o benefício econômico de apenas 390 reais (moeda local). Considerando os níveis de $127\ \mu g/m^3$ constatados anteriormente, constata-se que era preciso no mínimo 20% de área coberta de árvores para alcançar o limite de boa qualidade do ar (até $50\ \mu g/m^3$). Esses resultados sugerem que a estratégia de adição de árvores principalmente ao nível das vias congestionadas constitui estratégia viável para melhorar a qualidade do ar.

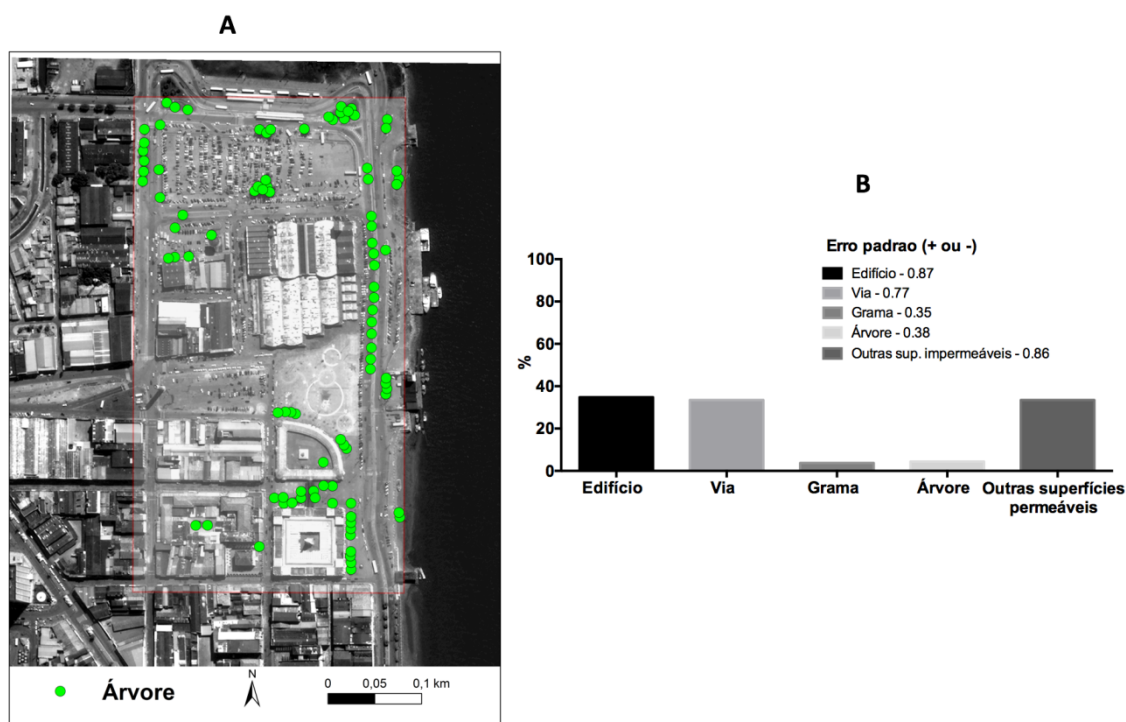


Figura 89: Distribuição das árvores e classificação do uso do solo na área do Mercado Municipal baseado numa amostra de 3.000 pontos, usando o software I-tree Canopy.

Tabela 29: Potencial benefício das árvores na remoção de poluentes MP_{10} em kg baseado no software I-tree Canopy

| Poluente | Descrição do benefício | Taxa de remoção ($kg\ ano^{-1}$) | Erro Padrão | Valor monetário* (R\$/T/ano) | Erro Padrão |
|-----------|---------------------------------|------------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
| MP_{10} | Partículas removidas anualmente | 16.8 kg | ±1.39 | R\$ 390.00 | ±32.41 |

* Taxa cambial do dólar para o real no dia 27-02-2017

4 Conclusão

As simulações microclimáticas realizadas neste capítulo propõem medidas que visam melhorar o conforto térmico e a qualidade do ar em Aracaju, as quais a seguir são apresentadas:

- I. A inclusão adequada de árvores melhora o conforto térmico na cidade, pois um aumento de 38% de cobertura vegetal pode reduzir até 1°C a temperatura do ar;
- II. A inclusão adequada de árvores melhora a qualidade do ar, pois 9% de áreas cobertas por árvores, se bem expostas aos poluentes, pode remover 16.8 kg de MP₁₀ anual com o benefício econômico de R\$ 390 reais;
- III. A redução do fluxo de automóveis nas vias congestionada melhora a qualidade do ar, pois a diminuição de 60% número de automóveis pode reduzir até 70 µg m⁻³ as concentrações de MP₁₀;
- IV. A manutenção de espaços ventilados melhora a conforto térmico e a qualidade do ar, pois a aceleração da velocidade do vento nas vias orientadas preferencialmente oeste-leste ameniza as altas temperaturas e possivelmente facilita o transporte de poluentes.

Capítulo 8: Plano de ação para o ordenamento do território baseado na avaliação climática

1 Introdução

Neste capítulo é apresentado um plano de ação para o ordenamento do território com orientações climáticas relevantes que têm como objetivo (i) melhorar as condições de conforto térmico mitigando o excesso de calor, (ii) melhorar as condições de ventilação e (iii) melhorar a qualidade do ar reduzindo as emissões de poluentes nas vias movimentadas. Segundo Alcoforado et al., (2015) as orientações climáticas são as medidas que podem contribuir para melhorar os componentes do clima urbano ou mitigar aqueles considerados como adversos para a saúde e conforto humano ou que originem ambientes (interiores ou exteriores) pouco eficientes do ponto de vista energético, com base na alteração dos fatores que condicionam os referidos componentes.

É de salientar que as orientações climáticas que agora se apresentam, não são rígidas, mas, como o próprio nome sugere, são recomendações compreensivas nas quais os planejadores possam ter informações climáticas que possam, dentro de uma equipe transdisciplinar, auxiliar as decisões de projeto e desenho urbanos. Baseado em cada uma das URCH apresentadas no capítulo 6, são destinadas orientações climáticas gerais e especializadas que (re)ordenam o território em função das diferentes respostas climáticas. Nesse sentido, o quadro das orientações climáticas especializadas foi incorporado ao macrozoneamento proposto pelo Plano Diretor de Desenvolvimento de Aracaju – PDDU/2015 com o objetivo de tentar relacionar as diretrizes normativas do uso e ocupação do solo com os aspectos do clima urbano. O art. 78 do PDDU/2015 orienta a ocupação do solo aracajuano de forma adequada às características do meio físico para garantir o equilíbrio climático da cidade, tendo para isso os seguintes critérios urbanísticos como a taxa de ocupação, taxa de permeabilidade, recuos e afastamentos dos edifícios e o coeficiente de aproveitamento. Numa primeira análise, as orientações climáticas deste estudo podem integrar e complementar aos critérios urbanísticos referidos, pois assim como esses, elas advêm do uso e ocupação do solo.

2 Orientações climáticas gerais para mitigar o efeito adverso do clima de Aracaju

2.1 Medidas para mitigar o estresse térmico

Em Aracaju, os níveis de estresse térmico são potencializados pelos climas locais existentes. Durante o período diurno, as situações de desconforto térmico podem ainda estar ligadas ao aumento do consumo energético para o arrefecimento dos edifícios.

O fundamento das estratégias de mitigação do sobreaquecimento nas cidades tropicais com vistas ao melhoramento do conforto térmico no espaço aberto perpassa principalmente pela proteção da radiação solar intensa com a criação de áreas sombreadas (Emmanuel et al., 2007; Lin et al., 2010) e pelo aumento da ventilação natural (Lopes et al., 2011; Ng, 2009). A mitigação do excesso de calor pode ser alcançada com 4 medidas gerais: (i) criação adequada de espaços verdes, (ii) proteção contra a temperatura radiativa média excessiva, (iii) melhoria da ventilação natural, (iv) controle adequado do Fator de Visão do Céu (ou do volume do edificado).

2.1.1 Medida 1: criação adequada de espaços verdes

Os espaços verdes ou floresta urbana é a infraestrutura ecológica mais importante e versátil que se pode encontrar nas cidades. A floresta urbana consiste em todas as árvores dentro da cidade que, por sua vez, trazem múltiplos benefícios para melhorar a saúde humana e a qualidade do ambiente (Nowak e Crane, 2002). A árvore fornece sombra protegendo da radiação solar. Como resultado disso, foi demonstrado em Aracaju que, de fato, os espaços verdes amenizaram a temperatura até 2°C em relação a sua área construída envolvente (capítulo 3) bem como influenciam no balanço energético do corpo humano como na redução da temperatura radiativa média (capítulo 4). No contexto tropical, uma simples árvore tem a capacidade de gerar sensação de conforto térmico no seu entorno imediato (Abrel et al., 2010). Nesse sentido, a criação adequada de espaços verdes é uma medida extremamente recomendável para melhorar o conforto térmico como por exemplo o plantio de árvores nos espaços abertos e nas vias, a construção de “oásis verdes” ligando a uma rede de corredores verdes e de ventilação urbana (Figura 90).



Figura 90: Presença de árvores em conexão com o corredor de ventilação urbana na avenida Ivo do Prado (Rio Sergipe à margem esquerda).

Crédito: Tito Garcez, 2011

Fonte: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1437521>. Acesso em 25 de mar. 2017

Nas áreas densamente construídas como os centros urbanos, o plantio de árvores pode ser um desafio devido à potencial interrupção da infraestrutura, calçadas e estradas. No entanto, novas ações podem ser implementadas através do projeto urbano inovador, em que as árvores formam parte dos elementos urbanos existentes: por exemplo, em vez de colocar permanentemente árvores dentro de uma rua, podem ser colocadas e recolocadas usando grandes “caixas de plantio verde” (Mills, et al., 2015) (Figura 91). Isso permite uma rápida implementação de novos recursos florestais urbanos nas áreas ociosas, além do que, cria área sombreada “móvel” que melhora termicamente o espaço urbano imediato.

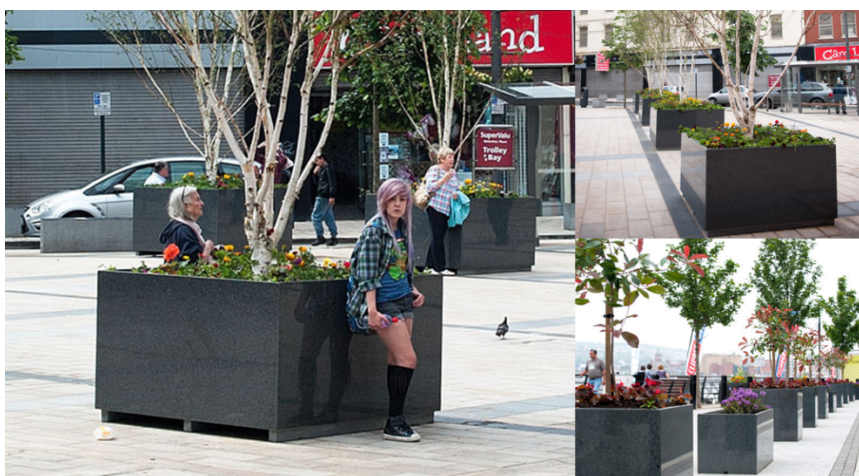


Figura 91: Exemplo de árvores integradas nos centros urbanos. A estratégia “caixa de plantio verde” (*Bespoke granite tree planters*) é mostrada na cidade de Derry, Irlanda.

Fonte: <http://www.externalworksindex.co.uk/entry/113149/IOTA/Bespoke-granite-tree-planters-Derry-City-Council/>. Acesso em 25 de mar. 2017.

A arquitetura “verde” urbana - tipo de espécies, benefícios e inconvenientes - devem ser equacionados pelos planejadores durante a implementação. No capítulo 3, alertou-se que as áreas dentro do espaço verde expostas à alta radiação solar podem ter situações de desconforto térmico. Por outro lado, Vos et al., (2013) demonstraram através de modelos que as árvores nas vias levam a concentrações de poluentes maiores do que a melhora da qualidade do ar, pelo fato que as árvores reduzem a ventilação que é a responsável pela diluição dos poluentes emitidos pelo tráfego. Portanto, é desejável considerar harmonicamente os benefícios da ventilação e das árvores na construção e revitalização dos espaços urbanos, sem perder de vista o risco a queda de árvores causado pelos ventos fortes.

2.1.2 Medida 2: proteção contra a temperatura radiativa média (T_{trm}) excessiva

Uma medida mitigadora importante para criar e planejar espaços urbanos aprazíveis do ponto de vista térmico é a proteção contra a T_{trm} excessiva. Essa apreciação é importante na avaliação do conforto térmico, pois a T_{trm} considera a influência combinada de todos os fluxos radiativos do ambiente. Foi constatado no capítulo 4 que Aracaju experimenta sensações de *calor* e *moderado calor* na maior parte dos dias, que se traduzem em termos de planejamento, por exemplo, ao observar um assento público exposto à intensa T_{trm} durante o dia (Figura 92). O sobreaquecimento da superfície (por condução) resultante da prolongada radiação solar pode provocar sensações de desconforto térmico no ocupante, fato que pode reduzir a utilidade do assento. Nesse sentido, o aumento de áreas sombreadas seja pela disposição (e uso) dos materiais de construção ou de preferência pelas árvores são medidas altamente recomendadas.



Figura 92: Assento público desprovido de proteção contra a T_{trm} excessiva no bairro Farolândia.

2.1.3 Medida 3: Melhoria da ventilação no espaço urbano

As condições de ventilação urbana são um ponto-chave no que concerne à condição climática da cidade, pois a depender do potencial de ventilação de uma área, mitiga-se o estresse térmico através da advecção e transporte de ar mais fresco. Nesse caso, as medidas devem inicialmente ser endereçadas para uma boa circulação do ar como os corredores de ventilação, desde que acompanhados preferencialmente de áreas sombreadas (pelas árvores) (Figura 93).



Figura 93: Corredor de ventilação urbana na Orla de Atalaia (mar à margem direita).

Crédito: Tito Garcez, 2011

Fonte: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1437521>

2.1.4 Medida 4: controle do Fator de Visão do Céu (FVC)

A complexidade da estrutura urbana de Aracaju caracteriza-se por grupos de edifícios e ruas de dimensões variadas. No caso das ruas estreitas e prédios altos, isto é, quando a relação H/W é elevada, reduz-se o FVC aumentando a carga térmica. No caso de Aracaju, foi constatado durante o dia que uma diminuição de ~0.5 no FVC pode produzir uma diferença de anomalia térmica positiva próxima de 1.2 °C (capítulo 6). Essa medida passa pela intervenção no volume das construções e na relação H/W que deve ser ≤ 1 (Andrade, 2003; Lopes, 2003). Porém, deve-se atentar para o fato que em ambientes tropicais, o FVC elevado pode aumentar os níveis de estresse térmico por causa da entrada da radiação solar intensa, o que se recompensa com a inclusão adequada de árvores ou outros elementos na promoção de áreas sombreadas (Figura 94).



Figura 94: Edifícios com uma relação W/H >1 no bairro Jardins.
Crédito: Tito Garcez, 2011

Fonte: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1437521>

2.2 Medidas para melhorar a qualidade do ar

O setor de transporte é o principal responsável pelo problema de poluição do ar em Aracaju notadamente pelas emissões do tráfego de veículos (Figura 95). De acordo com os primeiros resultados com modelação, as concentrações estimadas de MP_{10} na cidade violam os limites nacionais de qualidade do ar, significando um possível problema não somente ambiental, mas de saúde pública devido aos efeitos prejudiciais na saúde humana.

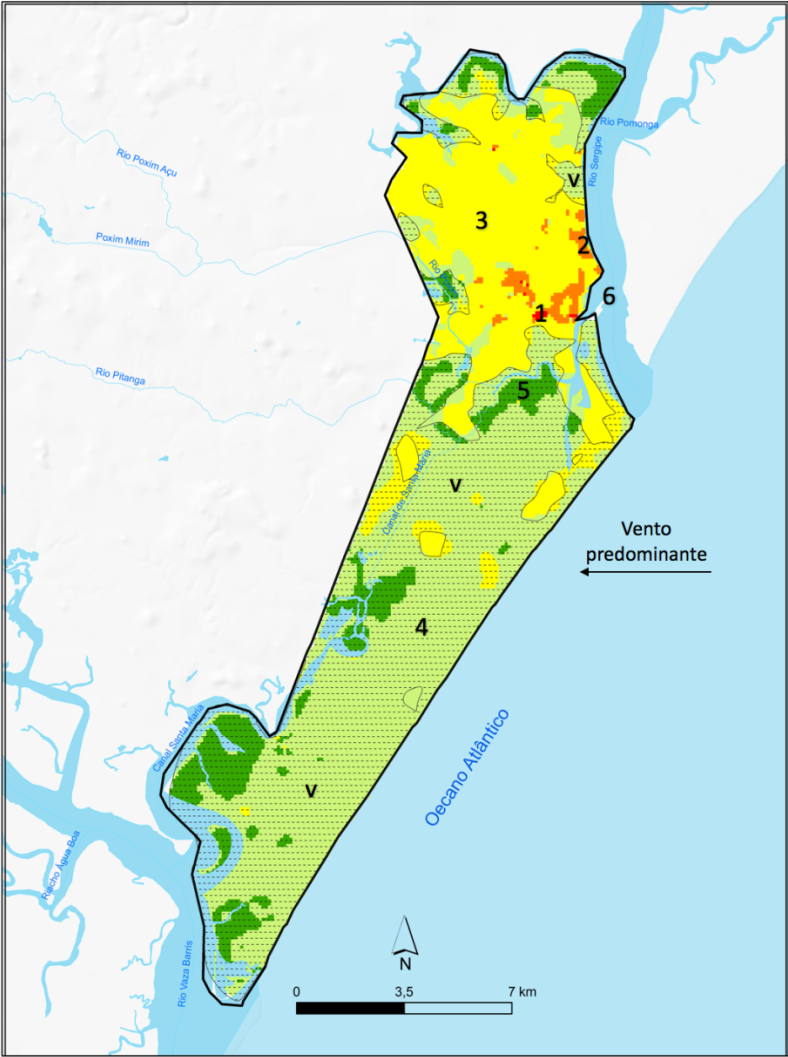
A *prevenção* de efeitos adversos da poluição do ar urbana sobre a saúde exige adaptações entre o uso do solo (ventilação urbana em harmonia com arranjo físico) e planejamento dos sistemas de transporte, enquanto a *mitigação* perpassa por atenuações específicas que incluem a redução da demanda de tráfego de veículos, a substituição de materiais perigosos, o controle de emissões e, finalmente, o controle de exposição (Bhatia e Rivard, 2008; EPA, 1998). A floresta urbana constitui uma estratégia importante frente ao problema da poluição do ar nas cidades devido ao benéfico das árvores na remoção de poluentes atmosféricos (Nowak et al., 2006, Mills et al., 2015). A melhoria da ventilação é também outra medida importante para a qualidade do ar uma vez que a ação do vento remove (e dilui) os poluentes atmosféricos no interior da cidade, como por exemplo, as vias orientadas oeste-leste que canalizam os ventos predominantes (Capítulo 5).



Figura 95: Tráfego de automóveis e sua relação com a poluição do ar no centro da cidade.

3 Orientações climáticas espacializadas nas escalas meso e microclimáticas

A Figura 96 e a Tabela 30 mostram o mapa das URCH com os corredores de ventilação urbana e onde são endereçadas orientações climáticas concretas para mitigar o estresse térmico e melhorar a qualidade do ar.



| Áreas de intervenção | Unidade de Resposta Climática Homogênea | |
|---------------------------------|---|--|
| Áreas predominantemente urbanas | 1 | Áreas construídas de elevada densidade |
| | 2 | Áreas construídas de média densidade |
| | 3 | Áreas construídas de baixa densidade e espaços abertos |
| Espaços verdes | 4 | Áreas predomínio de vegetação herbácea e arbustos isolados, ocupação agrícola e com alguns assentamentos urbanos |
| | 5 | Florestas de porte arbóreo e parques urbanos |
| Proximidade aos corpos d'água | 6 | Corpos d'água |
| Ventilação urbana | V | Corredores de ventilação |

Figura 96: Delimitação das áreas para as quais são definidas orientações climáticas para o ordenamento urbano.

Tabela 30: Resumo das orientações climáticas espacializadas para o ordenamento em Aracaju. Adaptado de Alcoforado et al. (2005); Lopes e Correia (2012) e Ng (2009).

| URCH (climatopos) | Orientações climáticas |
|---|---|
| <p>1</p> <p>Áreas construídas de elevada densidade</p> <p>(Bairros: Jardins e Grageru)</p> | <p><u>Estresse térmico</u></p> <p>1.1 Reduzir ou evitar áreas densamente construídas (volume do edificado e número de pavimentos); manter as construções urbanas razão H/W elevada (se possível ≤ 1 com a presença sombreada de árvores, desde que não impeçam o fluxo de ar); alinhar a disposição dos edifícios com os ventos prevalentes (Leste e Sudeste) quando possível;</p> <p>1.2 Identificar, ampliar e criar corredores de ventilação de preferência no sentido Leste-Oeste;</p> <p>1.3 Maximizar uso da floresta urbana, favorecendo uma estrutura diversificada de espaços verdes a exemplo da “caixa de plantio verde”, e com alternância de áreas abertas e arborizadas, dando preferência à vegetação perene (38% de cobertura vegetal pode reduzir em até 1°C a temperatura do ar);</p> <p>1.4 Utilizar material de construção e cobertura de baixa condutividade e albedo elevado.</p> <p><u>Qualidade do ar</u></p> <p>1.5 Reduzir o fluxo de automóveis nas vias de circulação para alcançar os níveis aceitáveis de qualidade do ar (a diminuição de 60% o número de automóveis pode reduzir até 70 $\mu\text{g m}^{-3}$ e 30% em até 42 $\mu\text{g m}^{-3}$ as concentrações de MP_{10});</p> <p>1.6 Incluir adequadamente árvores próximas das vias de circulação ou através da “caixa de plantio verde” como forma de controle da poluição originário tráfego de automóvel;</p> <p>1.7 Deve-se ter atenção evitar a inclusão excessiva de árvores nas vias com potencial de remoção de poluentes devido à boa ventilação (sentido Leste-Oeste).</p> |
| <p>2</p> <p>Áreas construídas de média densidade</p> <p>(Bairros: Luzia, São José, Centro, Palestina, Cidade Nova, Santo Antônio, Dezoito do Forte)</p> | <p><u>Estresse térmico</u></p> <p>2.1 Manter uma razão $H/W \leq 1$ nas construções urbanas;</p> <p>2.2 Criar espaços verdes de média dimensão e preencher os espaços intersticiais com vegetação ou criar estoques de árvores com a “caixa de plantio verde” nas áreas mais concentradas;</p> <p>2.3 Preservar a orientação 1.2 se possível.</p> <p><u>Qualidade do ar</u></p> <p>2.4 Preservar a orientação 1.5, 1.6 e 1.7, quanto possível.</p> |

| | | |
|---|--|---|
| 3 | <p>Áreas construídas de baixa densidade e espaços abertos</p> <p>(Barrios da Área central, Norte e Zona de Expansão)</p> | <p><u>Estresse térmico</u></p> <p>3.1 Preservar a orientação 1.1 o quanto possível;</p> <p>3.2 Criar espaços verdes extensos no interior e entre as áreas edificadas; criar estoques de árvores com a “caixa de plantio verde” é também recomendável;</p> <p>3.3 Preservar a orientação 1.2;</p> <p>3.4 Preservar a orientação 1.4, o quanto possível.</p> <p><u>Qualidade do ar</u></p> <p>3.5 Preservar a orientação 1.5, 1.6 e 1.7, quando necessário;</p> |
| 4 | <p>Áreas com predomínio de ocupação agrícola, vegetação herbácea e arbustos isolados</p> <p>(Bairros parte Sul: Coroa do Meio, Atalaia, Zona de Expansão)</p> | <p><u>Estresse térmico</u></p> <p>4.1 Nas áreas de expansão urbana: criar zonas verdes e preservar as orientações 1.1, 1.2 e 1.4;</p> <p>4.2 Manter e, se possível, aumentar o número de parques urbanos porque têm um papel importante na promoção de condições bioclimáticas favoráveis.</p> |
| 5 | <p>Florestas de porte arbóreo e parques urbanos</p> <p>(Ladeados pelos corpos d’água e reserva florestal e parques urbanos)</p> | <p><u>Estresse térmico</u></p> <p>5.1 Manter os espaços verdes existentes e favorecer a manutenção de pequenos, jardins com vegetação o quanto possível densa.</p> <p>5.2 Evitar espaços demasiados abertos dentro de parques urbanos devido à radiação solar excessiva;</p> |
| 6 | <p>Corpos d’água</p> | <p><u>Estresse térmico</u></p> <p>6.1 Nas áreas de expansão urbana próximas ao mar e estuário: evitar a construção de edifícios altos ou médios com a fachada orientada paralelamente ao mar e estuário; manter corredores abertos perpendiculares ou oblíquos em relação ao mar; preservando as matas ciliares;</p> <p>6.2 Nas áreas urbanizadas preservar a orientação 5.1.</p> |
| V | <p>Corredores de ventilação</p> <p>(Barrios: extremo Norte e parte Sul)</p> | <p><u>Estresse térmico e qualidade do ar</u></p> <p>V.1 Preservar as orientações 1.2 em harmonia com a 1.1;</p> <p>V.2 Evitar a plantação de manchas arbóreas extremamente densas nas ruas e espaços abertos de modo que impeçam a circulação dos ventos dominantes (orientação 1.7).</p> |

4 Orientações climáticas e o macrozoneamento urbano

Entende-se que a aplicação dos Mapas Climáticos Urbanos (MCUs) deve estar em sintonia com as escalas de interesse dos órgãos de planejamento. O Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de 2015 (PDDU) estabeleceu, através de amplo debate envolvendo equipes técnicas municipais e a população, a proposta do macrozoneamento que se fundamenta na divisão da estrutura urbana em zonas considerando a infraestrutura, as condições ambientais e a morfologia existente (Aracaju, 2015a). São quatro zonas principais, a saber: Zona de Adensamento Básico (ZAB), Zona de Adensamento Preferencial/Prioritário (ZAP), Zona de Adensamento Controlado (ZAC) e a Zona de Adensamento Restrito (ZAR). Para cada uma dessas zonas, aplicaram-se o entendimento das URCH da figura 97 e as orientações climáticas espacializadas da tabela 31 a fim de relacionar os pressupostos legais com os aspectos do clima urbano.

A ZAB é considerada pelo PDDU como as áreas que apresentam potencial de urbanização, porém com déficit de infraestrutura, sistema viário, transporte, comércio e serviços, onde é preciso adensar de forma controlada o uso e ocupação do solo (Figura 98). Baseado na avaliação climática, observa-se na ZAB que há um comprometimento térmico indicado pelo predomínio da URCH3 e áreas com excesso de calor, o que se recomenda a aplicação das orientações climáticas **3.1** e **3.2** (ver a tabela 31), principalmente nos bairros a norte caracterizados por uma ocupação com estrutura precária e desordenada (Soledade, Cidade Nova, Palestina, Japãozinho, Bugio). No bairro Coroa do Meio localizado na orla marítima, o PDDU induz ao adensamento urbano, ao passo que, o mapa das URCH indica que essas áreas merecem atenção em relação às condições climáticas locais, pelo que sugere considerar durante o adensamento as orientações **3.3** e **4.1** atribuídas às URCH3 e URCH4 e as orientações **V.1** e **V.2** atribuídas aos corredores de ventilação urbana a fim de garantir a boa circulação do ar fresco do mar e, conseqüente, o melhoramento do conforto térmico. Na porção extremo norte e sul da ZAB, há presença significativa das URCH5 e URCH6 que representam respectivamente os espaços verdes e os corpos d'água, onde se recomenda a orientação **5.1** aliada as **6.1** e **6.2**. A aplicação dessas orientações climáticas ajuda a preservar o ecossistema flúvio-marinho manguezal e a promover condições bioclimáticas aprazíveis que, por sua vez, contribuem para o equilíbrio ambiental almejado pelo macrozoneamento. Nos bairros Grageru (URCH1) e Luzia (URCH2) caracterizados por ocupação urbana densa e estruturada, recomenda-se principalmente as orientações com a inclusão adequada de espaços verdes **1.3**, **2.1** e **2.2** quer para o melhoramento do conforto térmico e **1.5** e **1.6** para o melhoramento da qualidade do ar (Figura 98).

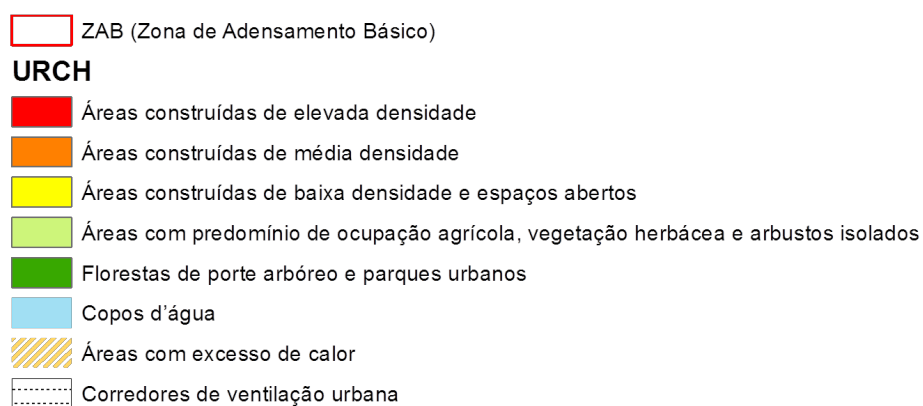
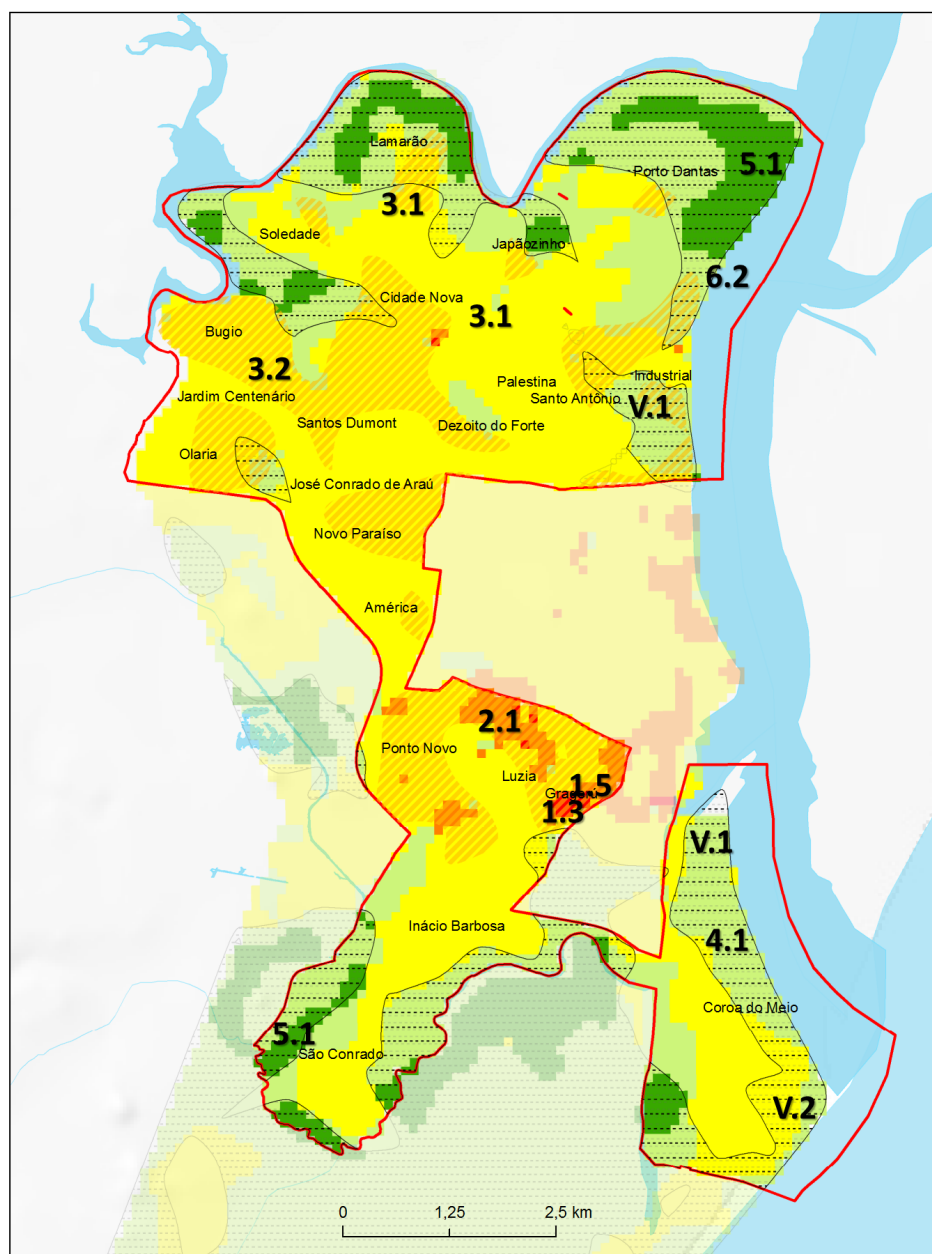


Figura 97: Orientações climáticas especializadas e ZAB prevista no PDDU de Aracaju/2015.

No que diz respeito à ZAP, o PDDU considera a zona com potencial construtivo e induz intensificar o adensamento e a diversificação do uso e ocupação do solo dado a disponibilidade de infraestrutura, equipamentos urbanos e acessibilidade (Figura 99). Ao confrontar-se com o mapa das URCH, nota-se nos bairros da parte nordeste da ZAP (Centro, Treze de Julho, São José e Jadins) a presença das URCH2 e URCH1 que sinalizam situações críticas de estresse térmico com excesso de calor, baixo potencial de ventilação e elevados níveis de concentração de poluentes PM_{10} , pelo que um aumento no adensamento urbano comprometeria ainda mais as condições climáticas locais. O desequilíbrio ambiental nesse caso pode ser minimizado com aplicação das orientações **2.1** para regularização das tipologias do edificado e **2.2 e 1.3** (ver tabela 31) para suprir a carência de espaços verdes que coaduna com a diretriz proposta pelo PDDU no seu art. 20 inciso IV de “intensificar o aumento de áreas verdes e arborização no sistema viário, tendo em vista o melhoramento da qualidade ambiental”. No que diz respeito à arborização no sistema viário previsto no PDDU, o mapa das URCH sugere a inclusão adequada de árvores nas vias de intenso tráfego de automóveis traduzidas nas orientações **1.6 e 1.7** em harmonia com a **1.5**, pois foi demonstrado que as concentrações de MP_{10} em muitas vias de circulação da ZAP violam os limites nacionais de qualidade do ar. Apesar dessa conclusão, é necessário não bloquear o ar com diversificação das árvores.

Nos bairros da parte Sul da ZAP (Inácio Barbosa, Farolândia e Atalaia) onde o adensamento urbano é intensificado, as características da morfologia urbana assemelham-se à URCH4 com baixa densidade e elevado potencial de ventilação urbana. Nessas áreas, é recomendável preservar a orientação **4.1** para as alturas e espaçamentos dos edifícios bem como as orientações **V.1 e V.2** para a manutenção dos corredores de ventilação evitando um comprometimento climático no futuro (Figura 99).

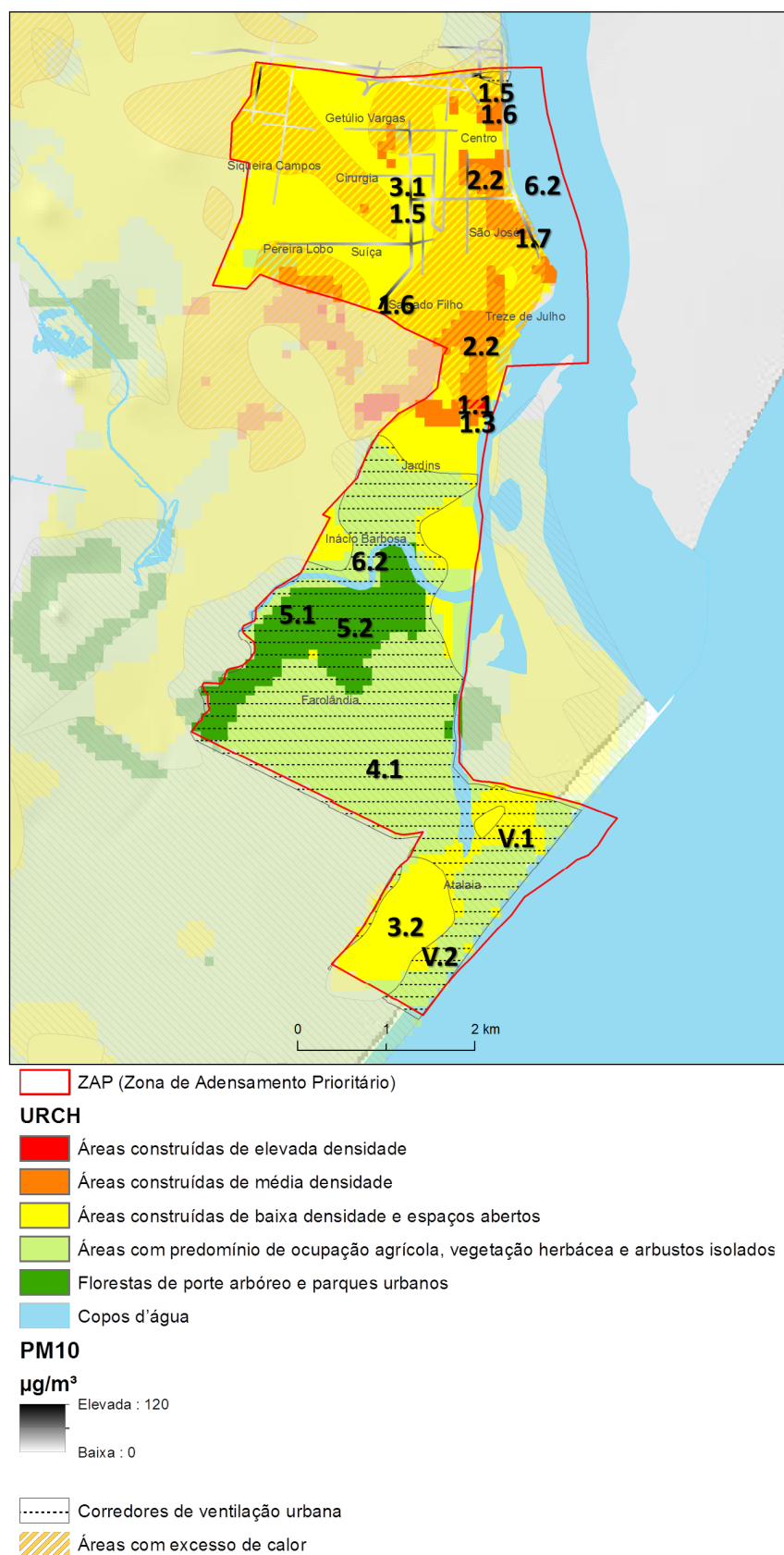


Figura 98: Orientações climáticas especializadas e ZAP prevista no PDDU de Aracaju/2015.

Já a ZAC tem como diretriz, segundo o PDDU, controlar a ocupação do uso do solo devido ao acentuado déficit de infraestrutura e serviços urbanos, além da fragilidade ambiental (Figura 100). A parte norte da ZAC compreende os bairros Capucho e Jabotiana configurados com crescimento urbano nos últimos anos em função de investimentos de empreendimentos habitacionais. Relacionando com o mapa das URCH, verifica-se que essa área foi classificada como URCH3 em que uma atenção deve ser dada a orientação **3.1** e **3.2** (ver tabela 31) durante o processo de adensamento em respeito ao efeito térmico moderado e à redução média do vento, onde inclusive nota-se uma redução da vegetação. Aliás, a fragilidade ambiental verificada na ZAC está atrelada a devastação do mangue que pode ser representado pelas URCH5 e URCH6, a partir das quais, é oferecida as orientações **5.1** e **6.1** com objetivo de preservar esse ecossistema.

A parte sul da ZAC compreende os bairros Santa Maria, Aeroporto e parte da Zona de Expansão caracterizados pela ocupação de baixa densidade, onde inclusive o PDDU alerta que o processo de uso e ocupação do solo está direcionado e evidenciado na intensificação da verticalização, expansão, migração e especulação imobiliária. Segundo o conhecimento do clima local, se adensar nos moldes atuais pode haver um aumento da temperatura no futuro próximo. Além disso, na ZAC é muito comum a existência de espaços desocupados ou espaços abertos representados pelas URCH4 e corredores de ventilação. Isso significa que o adensamento urbano deve levar em conta a disposição geométrica dos edifícios e a inclusão adequada de espaços verdes na promoção de áreas sombreadas e boa circulação do ar a fim de garantir ótimas condições de conforto térmico. Nesse caso, o mapa das URCH sugere a utilização das orientações **4.1** e **4.2** contra a excessiva radiação solar nos períodos de maior aquecimento diurno em harmonia com as **V.1** e **V.2**, especialmente nas áreas próximas a orla marítima (Figura 100).

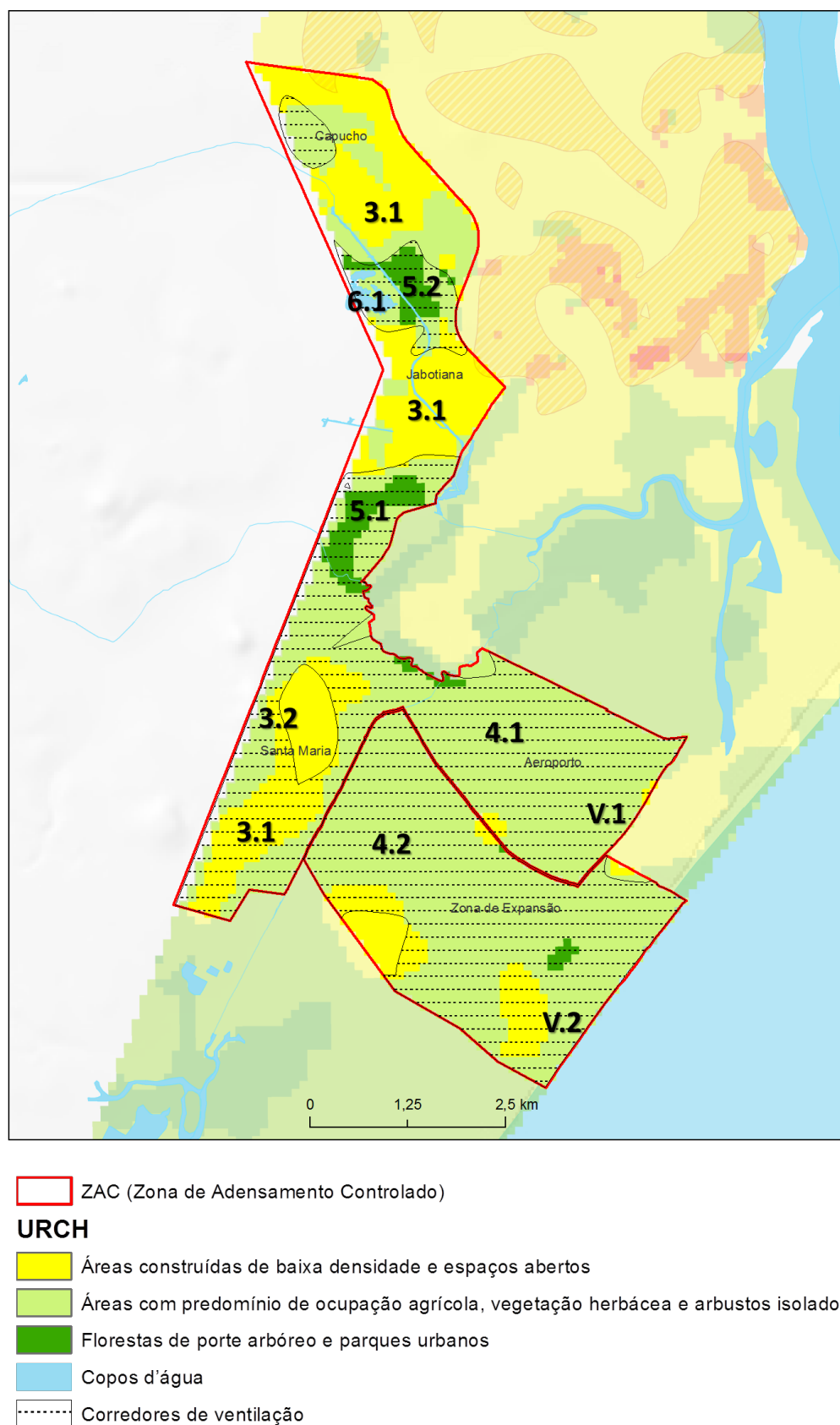
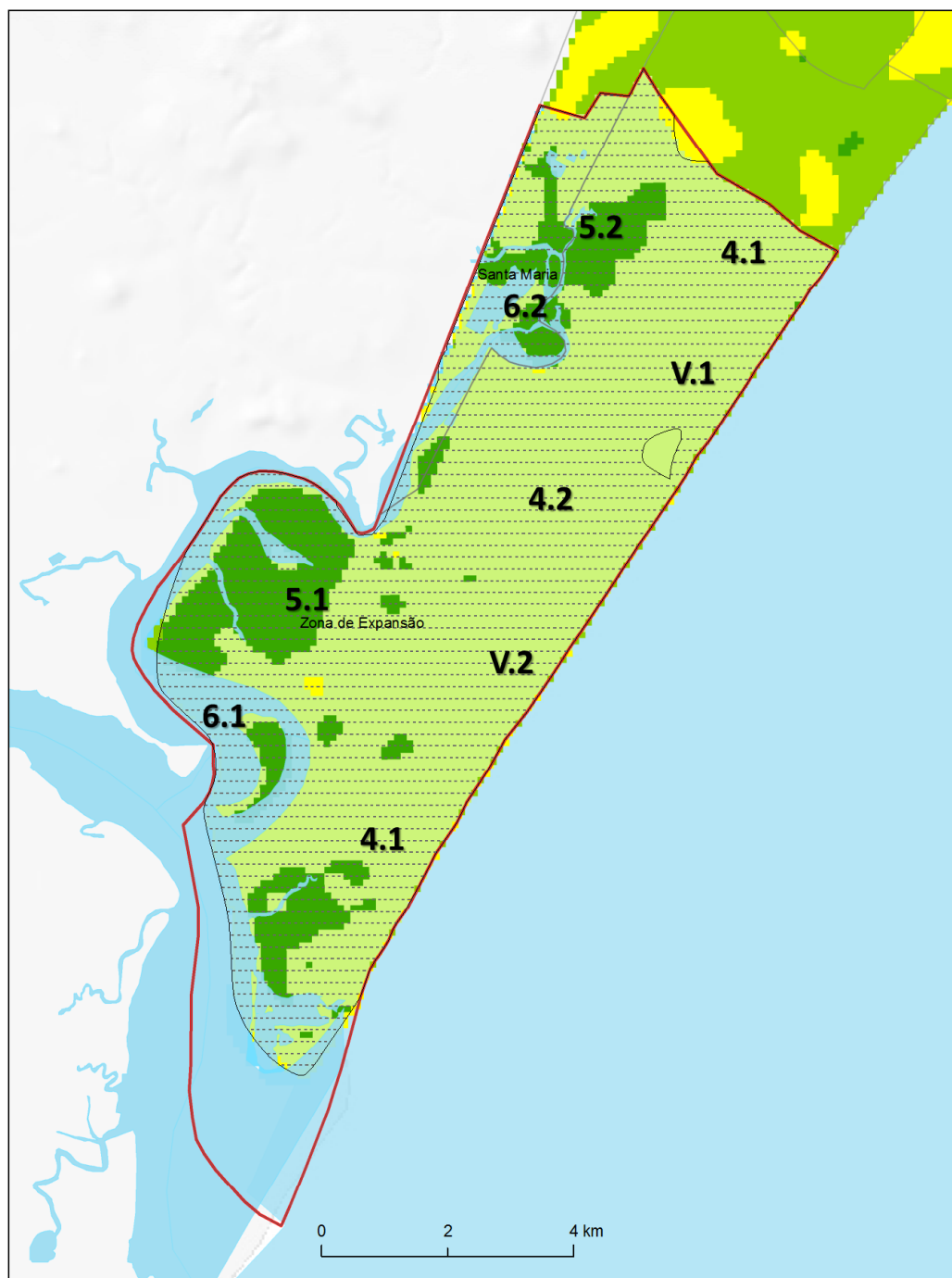


Figura 99: Orientações climáticas especializadas e ZAC prevista no PDDU de Aracaju/2015.

A ZAR são as áreas que apresentam, segundo o PDDU, um padrão de ocupação disperso e descontínuo, com acentuado déficit ou ausência de infraestrutura e serviços urbanos que, dentro de uma avaliação climática, foram classificadas pelas URCH4, URCH5, URCH6 e corredores de ventilação (Figura 101). Ao longo dos últimos anos, a ZAR vem sofrendo transformações no seu uso e ocupação do solo por causa do incremento de residências unifamiliares e do aparecimento de condomínios horizontais fechados. O padrão atual de baixa densidade de ocupação da ZAR, todavia, não a exime do estresse térmico devido à exposição prolongada à radiação solar, fato que precisa ser levado em conta durante o adensamento urbano. Para que o adensamento se compatibilize com equilíbrio ambiental requerido no PDDU, o mapa das URCH dá uma contribuição climática recomendando as seguintes orientações: **4.1** e **4.2** (ver tabela 31) para zoneamento das áreas agrícolas ou para definição de tipologias dos edifícios e quadras, criando áreas sombreadas (e com vegetação) ou; as **V.1** e **V.2**, de modo que, evite-se a construção de edifícios altos ou médios com a fachada orientada paralelamente ao mar para garantir uma boa ventilação; as **5.1**, **5.2**, **6.1** e **6.2** na preservação do ecossistema florestal (matas ciliares) junto aos corrégos (Figura 101).

Cabe ressaltar que, se o processo de adensamento urbano ignorar as recomendações climáticas apresentadas pode agravar as situações de estresse térmico existentes ou surgir novos núcleos de calor. O enfretamento dessas questões deve ser visto de forma integrada entre a aplicação das orientações climáticas e o macrozoneamento urbano. Isto significa que a manutenção dos corredores de ventilação é fundamental não só para as zonas à beira do mar, mas também para as adjacentes. Por exemplo, a verticalização presente na ZAP pode comprometer a boa circulação na ZAC ao bloquear os ventos predominantes de Leste.



ZAR (Zona de Adensamento Restrito)

URCH

Áreas construídas de baixa densidade e espaços abertos

Áreas com predominância de ocupação agrícola, vegetação herbácea e arbustos isolados

Florestas de porte arbóreo e parques urbanos

6

Corredores de ventilação

Figura 100: Orientações climáticas especializadas e ZAR prevista no PDDU de Aracaju/2015.

Capítulo 9: Conclusão

A investigação que se apresentou foi motivada pela mudança do clima urbano de Aracaju. Para isso, considerou, nas diferentes escalas meso, local e micro, a relação entre a complexidade morfológica urbana e os factores não urbanos na compreensão dos padrões térmicos locais, ambiências térmicas e qualidade do ar, que são ferenciadas na cidade. As condições climáticas tropicais da região com atuação de vários centros de ação e aos sistemas de mesoescala (ventos alísios) conferem a Aracaju um ambiente térmico naturalmente quente com característica “estressante”.

Baseado na técnica do sensoriamento remoto notadamente o uso extensivo das imagens de satélite GOES-13, complementado com os dados meteorológicos de superfície, caracterizou-se o comportamento diário da frente de brisa e, sobretudo, avaliou o seu impacto nas condições meteorológicas na região do Estado de Sergipe e nos padrões térmicos em Aracaju. Descobriu-se que houve um aumento médio da temperatura de 1°C e da radiação solar de 290 kJ m⁻² durante os *dias com frente de brisa marítima*. Após a passagem da frente de brisa marítima, constatou-se que as diferenças de temperatura entre a área central e o parque urbano se anulam e que as condições de estresse térmico em vários locais da cidade se agravam com o aumento até 2°C nos valores da Temperatura Fisiológica Equivalente (PET). Este fato reacende uma questão importante na literatura especializada que trata, à primeira vista, a frente de brisa marítima como um elemento benéfico no conforto térmico. Em Aracaju, suscita-se a discussão desse tema, apontando como causa a diminuição da nebulosidade e o aumento da radiação solar.

A utilização da Rede Climatológica Urbana é uma fonte confiável de dados climatológicos (que se encontra com já 2 anos de dados) e tem sido fundamental para a compreensão dos padrões térmicos locais e sua relação com o conforto térmico. Determinou-se que também a intensidade média da Ilha de Calor Urbana (ICU) de Aracaju (diurna e noturna) não foi expressiva variando entorno de 0,5°C durante a estação quente, embora na estação fresca as intensidades da ICU chegaram até 1,3°C no período da tarde. Em paralelo, a Ilha de Frescor Urbano mostrou-se dinâmica com variação sazonal e diária expressivas com a redução média até 2°C no espaço verde em relação a área construída envolvente.

As diferenças de conforto térmico na cidade ficaram evidentes a partir da existência dos climas locais. Demostram-se os climas locais na área central da cidade que são caracterizados por níveis de estresse térmico de *moderado* a

acentuado (valores médios horários do PET entre 29°C a 35°C) devido às altas taxas de edificação, cobertura asfáltica, à pouca ou nenhuma presença de vegetação e ao baixo potencial de ventilação do ar. Por outro lado, o clima local localizado próximo à beira do mar que é caracterizado pela maior exposição aos ventos úmidos do mar, as sensações térmicas constatadas foram as mais amenas ao longo do ano. Nestas áreas, as classes *fresco* e *confortável* dominam a maior parte do tempo, fazendo jus às condições de ventilação natural e baixas densidades de construção, apesar de apresentar em 25% dos casos, condições térmicas desconfortáveis frequentes no período da tarde devido ao aumento da temperatura e da temperatura radiativa média. O outro clima local identificado encontra-se no Parque da Cidade localizado no norte da cidade onde se observou a influência da vegetação (efeito refrescante) na diminuição da temperatura (média até 2°C). Porém, observou-se a existência de situações de desconforto térmico no parque urbano onde a sensação térmica mostrou-se crítica com a presença das classes do PET “*quente*” e “*muito quente*”, ocorrendo em mais que 20% dos casos durante as tardes quentes. Assim, os espaços verdes, se não forem bem geridos, pode efetivamente gerar situações de desconforto térmico frequentes, sobretudo a partir dos espaços abertos e mais expostos à forte radiação solar, o que pode comprometer as atividades dos ocupantes e a utilidade desses importantes espaços urbanos. A partir desses resultados conclui-se que a população pode estar submetida ao estresse térmico “*moderado e acentuado*” durante as tardes quentes, uma vez que as classes do PET “*quente*” e “*muito quente*” passaram a prevalecer (as frequências relativas chegaram a 30% dos 15.640 casos analisados no período entre 2014 a 2016). Daí a importância do monitoramento climatológico permanente na cidade para uma avaliação consistente das condições bioclimáticas.

Além das condições de estresse térmico, o estudo sobre a qualidade do ar revelou que pode existir um problema de poluição do ar em Aracaju. Essa conclusão levou em consideração os resultados gerados a partir do modelo concentração de poluentes atmosféricos (CAL3QHC). Foi demonstrado em muitas vias de circulação na área central da cidade que os níveis de concentrações de MP₁₀ originários do tráfego de automóveis (127 µg m⁻³) ultrapassaram os limites aceitáveis de boa qualidade do ar adotados nas cidades brasileiras. Os valores simulados pelo modelo significam que são uma medida das piores condições calculadas ao longo do dia (manhã e noite) em condições meteorológicas típicas do verão 2015. Esses resultados confrontam-se com os dados monitorados e publicados semanalmente pela ADEMA, a qual avalia o *status* da qualidade do ar como “*aceitável*”, pois os níveis dos poluentes (partículas totais em suspensão, fumaça e MP₁₀) não superaram os limites estabelecidos pelas normas nacionais. A lição que se retirou do confronto entre os dados simulados e monitorados, foi a necessidade urgente do monitoramento

da qualidade do ar na cidade focando principalmente nas vias potencialmente perigosas do ponto de vista da poluição atmosférica. O estudo microclimático desenvolvido na área central da cidade demonstrou que a redução de 60% fluxo de tráfego de automóvel nas vias de circulação mais congestionadas pode reduzir em até $70 \mu\text{g m}^{-3}$ as concentrações máximas de MP_{10} .

O conhecimento do clima urbano adquirido nesta investigação ao longo dos últimos anos levou à construção dos Mapas Climáticos Urbanos de Aracaju, notadamente as Unidades de Rosposta Climática Homogêneas (URCH). As URCH têm como característica uma “resposta climática potencial” influenciada pela combinação sintomática entre a morfologia urbana (densidade urbana e espaços verdes) e as condições de ventilação (rugosidade aerodinâmica e corredores de ventilação). Ao quadro da URCH, sobrepujaram-se o sistema de classificação das *Local Climate Zones* bem como as informações adicionais sobre a frente de brisa marítima, o conforto térmico e poluição do ar (estudadas nos capítulos 1, 4 e 5), dando uma maior consistência a avaliação climática. Desse modo, foram delimitadas seis URCH em Aracaju, a saber: **URCH1**, compreende as áreas construídas de elevada densidade com baixo potencial de ventilação urbana, onde o efeito térmico é elevado e a velocidade média do vento sofre uma redução considerável; **URCH2**, compreende as áreas construídas de média densidade com médio a baixo potencial de ventilação urbana, onde o efeito térmico é relativamente moderado e apresenta uma redução moderada na velocidade média do vento; **URCH3** compreende as áreas construídas de baixa densidade com médio a elevado potencial de ventilação urbana, onde o efeito térmico é relativamente baixo e o predomínio de boa ventilação é verificado; **URCH4** compreende as áreas de ocupação agrícola, vegetação espaça e com alguns aglomerados urbanos onde o efeito térmico é baixo e a ventilação urbana é ótima, pois os corredores de ventilação são ativos; **URCH5** são os espaços verdes com manchas florestas de porte arbóreo onde o efeito térmico é baixo devido à presença da vegetação; e **URCH6** os corpos d'água aos quais se atribui a função reguladora dos climas locais quer pela dissipação do calor diurno quer na produção de ar fresco quer por advecção do ar à cidade.

Articulam-se com essas URCH, medidas/orientações climáticas para o ordenamento do território. As orientações climáticas focaram na mitigação do estresse térmico e na qualidade do ar. A criação adequada de espaços verdes é uma medida importante devido ao efeito da vegetação na redução da temperatura e na remoção de poluentes atmosféricos. Ficou demonstrado nesta investigação que 38% da área coberta por árvores reduz até 1°C e que 5% remove até 16.8 kg ano^{-1} de MP_{10} . Para a proteção contra a temperatura radiativa média excessiva, recomendou-se o aumento de áreas sombreadas

pelas árvores ou pela disposição dos edifícios desde que favoreça as boas condições de ventilação. E neste ponto, é importante identificar, ampliar e criar corredores de ventilação que podem ser os espaços urbanos abertos ou as vias largas expostas aos ventos predominantes (sentido Leste-Oeste) em harmonia com áreas sombreadas pelas árvores. Outra medida mitigadora do estresse térmico passa pelo controle das densidades urbanas intervindo no volume das construções (Fator de Visão do Céu) e nas tipologias dos espaços urbanos ou edificado (relação entre altura e largura -H/W).

Compararam-se as orientações climáticas espacializadas com o macrozoneamento proposto pelo PDDU (2015) a fim de compreender como as diretrizes normativas do uso e ocupação do solo interagem com as características do clima urbano. Numa análise inicial, o mapa das URCH sugere atenção para a manutenção e a promoção de áreas aprazíveis nas zonas onde o PDDU induz ao adensamento urbano, principalmente nas áreas próximo a orla marítima. Nessas zonas, são recomendadas várias orientações climáticas direcionadas às tipologias de edifícios, à promoção de boa ventilação urbana e à inclusão adequada de espaços verdes. Por outro lado, o mapa das URCH e as diretrizes do PDDU salientam a inclusão adequada de espaços verdes na cidade. O resultado inicial da relação com o macrozoneamento demonstrou que as orientações climáticas podem integrar-se aos parâmetros normativos do uso e ocupação do solo.

Por todos os aspectos discutidos nesta investigação, entende-se que, ao considerar as orientações climáticas no ordenamento do território, melhorara-se a qualidade do clima e do ambiente, o que reflete numa contribuição importante para o desenvolvimento de Aracaju: torná-la mais habitável, atrativa e sustentável.

PERSPECTIVA INVESTIGATIVA E TRABALHOS FUTUROS

A perspectiva que se coloca adiante é a produção contínua e a aplicação dos conhecimentos climáticos (monitoramento climático, padrões térmicos, conforto humano, qualidade do ar) no desenvolvimento da cidade. Uma série de temas relacionados ao clima urbano, inclusive alguns apresentados nesta investigação, foram e estão sendo inicialmente explorados e discutidos com entidades que lidam com o planejamento e projeto urbano. A disseminação dos conhecimentos climáticos em Aracaju tem-se dado a partir do diálogo com os setores público, privado e acadêmico (Figura 101). Esses setores têm papéis estratégicos no desenvolvimento da cidade uma vez que são potenciais grupos de usuários e colaboradores nas questões relacionadas ao tempo e clima nas áreas urbanas (Dabberdt et al., 2005).

Como resultado dessas iniciativas, nasceu o projeto ARANET em parceria com grupos de investigação de universidades brasileiras e estrangeiras (IGOT – Instituto de Geografia e Ordenamento do Território) o qual consiste na implementação e manutenção de uma rede climatológica urbana que, além de colectar dados meteorológicos em vários locais cidade, inclui a acessibilidade e disseminação de informações climáticas. Além disso, Aracaju está incorporada na rede internacional do projeto *The World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT) que busca adquirir um banco de dados físicos das cidades para o ordenamento do território.

Apesar de considerar os resultados desta investigação relevantes no avanço de algumas generalizações acerca do clima urbano de Aracaju, entende-se que não se esgotam em sua plenitude dada a complexidade que é-lhes conferida. Isso ficou patente nas limitações apresentadas em cada capítulo, que se reunidas, dão uma direção para a consolidação dos conhecimentos climáticos e trabalhos futuros os quais a seguir serão alvo de interesse:

- Monitoramento regular do ambiente urbano em função das condições térmicas e de conforto;
- As repercussões sociais e ambientais da relação entre as alterações climáticas e o clima urbano de Aracaju no presente e futuro;
- Utilização de novos métodos e metodologias na avaliação bioclimática de Aracaju;
- O desenvolvimento de um estudo global sobre o Sistema de Brisa Marítima e sua influência nas condições meteorológicas nas regiões costeiras do Brasil.



Figura 101: Apresentação do clima urbano aos setores público, privado e acadêmico. Nota: (A) à empresa de Energia Elétrica ENERGISA Ltda. (setor privado); (B) à Universidade Federal de Sergipe (setor acadêmico); e (C) à Secretária do Meio Ambiente de Aracaju (SEMA)/Prefeitura Municipal (setor público); fonte: <http://www.aracaju.se.gov.br/index.php?act=leitura&codigo=60267>, acesso em 16 de abril de 2017.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, L., Labaki, L., Matzarakis, A. (2012). Reduction of mean radiant temperature by cluster of trees in urban and architectural planning in tropical climates: the case of Campinas, Brazil. PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits Needs Towards an Environmentally Responsible Architecture Lima, Perú 7-9 November 2012 Reduction.
- Acero, J. A., Arrizabalaga, J., Kupski, S., Katzschnner, L. (2013). Urban heat island in a coastal urban area in northern Spain. *Theoretical and applied climatology*, 113(1-2), 137-154.
- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C., Wieringa, J. (2003). Guidance on metadata and homogenization. WMO Td, 1186, 53.
- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., Zinzi, M. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques—the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 1-16.
- Alcoforado M. J., Lopes A., Andrade H., Vasconcelos J. (2009). Application of climatic guidelines to urban planning: the example of Lisbon (Portugal). *Landscape and Urban Planning* 90: 56–65.
- Alcoforado, M. J. (1999) Aplicação da climatologia ao planeamento urbano. Alguns apontamentos. *Finisterra - Revista Portuguesa de Geografia*, Lisboa, XXXIV (67-68): 83-94.
- Alcoforado, M. J. (2006) Planning procedures towards high climatic quality cities. Example referring to Lisbon. *Finisterra*, v. 41, n. 82, p. 49-64.
- Alcoforado, M. J. (2010) *Climatologia urbana para o ensino*. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos, N.º 3. (Coleção Clima e Mudanças Ambientais – CLiMA).
- Alcoforado, M. J., Andrade H., Lopes A., Vasconcelos J. (2005) Orientações climáticas para o Ordenamento em Lisboa. CEG, área de investigação de geo-ecologia, relatório 4, Universidade de Lisboa.
- Alcoforado, M. J., Lopes, A., Alves, E. D. L., Canario, P. (2014). Lisbon Heat Island - Statistical Study 2004-2012. *Finisterra*, 98, 61–80.
- Alcoforado, M.J., Matzarakis, A. (2010). Planning with urban climate in different climatic zones. *Geographicalia* 57, pp. 5-39.
- Alexander, P. J., Mills, G., Fealy, R. (2015). Using LCZ data to run an urban energy balance model. *Urban Climate*, 13, 14 37.
- Alonso, M. S., Fidalgo, M. R., Labajo, J. L. (2007). The urban heat island in Salamanca (Spain) and its relationship to meteorological parameters. *Climate Research*, 34(1), 39-46.
- Alves, E. D. L., Biudes, M. S. (2013). Method for determining the footprint area of air temperature and relative humidity. *Acta Scientiarum. Technology*, 35(2), 187-194.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes, G., Leonardo, J., Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728.
- Ambonini, F (2012). Estimativa das emissões de monóxido de carbono por veículos automotivos na cidade de Campinas/SP utilizando o modelo CAL3QHCR. 2012. 38 f.

Referências

- Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. <http://hdl.handle.net/11449/121800> (Acesso em 1 fev 2017).
- Andrade, H. (2003). *Bioclima humano e Temperatura do ar em Lisboa*. Dissertação de Doutorado em Geografia Física. Faculdade de Letras. Universidade de Lisboa: 435
- Andrade, H. E Vieira, R. (2005) Estudo climático de um espaço verde de Lisboa: o Jardim da Fundação Calouste Gulbenkian. Área de investigação de Geo- Ecologia, Relatório n.º 5, CEG, Lisboa, 46 p.
- Andrade, M., Fatima et al. (2012). "Vehicle Emissions and MP2.5 Mass Concentrations in Six Brazilian Cities." *Air Quality, Atmosphere Health* 5(1):79–88.
- Andrade, T. et al. (2002). Thermal comfort and urban climate of the tropical city of Salvador, Bahia. *TECBAHIA: Revista Baiana de Tecnologia Salvador*, v. 17, n. 3, p. 34-45, set./dez.
- Andrade, T., Nery, J., Moura, T., Katzschnner, L. (2015). Urban climatic map studies in Brazil: Salvador. In: Ng, E., Ren, C. (Eds.). *The urban climatic map: a methodology for sustainable urban planning*. Routledge.
- Anjos, M, Ganho, N., Araújo, H. (2014a). Uma análise dos contrastes topoclimáticos no espaço urbano e periurbano de Aracaju/SE: os campos térmicos e higrométricos. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S.l.], v. 13.
- Anjos, M. W. B. (2012a). *Ambiente Urbano: contrastes térmicos e higrométricos espaciais em Aracaju-Sergipe (Brasil)*. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal, 134f.
- Anjos, M. W. B., Ganho, N., Araújo, H. M. (2014b). A ilha de calor e a umidade relativa em Aracaju-Sergipe (Brasil). Intensidade e comportamento intradiurno. *Cadernos de Geografia*, (33), 47-57.
- Anjos, M. W. B., Gois, D. V., Cruz, R.; LIMA, L. (2012b). Climatologia urbana e espaços verdes: contributo ao planeamento das cidades. *Revista GeoNorte*, 3(9), 233-245.
- Anjos, M. W. B; Lopes, A. (2015). Urban Heat Island first statistical assessment based on an Mesoscale Climatological Network in Aracaju/Brazil (Poster). Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse, France.
- Anjos, M., Lopes, A., Alves, E. D. L., Lucena, A. J. (2017). Rede climatológica de mesoescala aplicada ao estudo da Ilha de Calor Urbano: o caso de Aracaju-SE. *Caminhos de Geografia*, 18(62), 203–216.
- Aracaju (2015a) Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Aracaju – Diagnóstico municipal/ Relatórios de Propostas. Disponível em <http://www.aracaju.se.gov.br/userfiles/relatorio-propostas-final.pdf>. Acesso em 18 de abr. de 2017.
- Aracaju (2015b) Projeto Lei complementar N°. de 2015. Disponível em <http://www.aracaju.se.gov.br/userfiles/anteprojeto-de-lei-pddu.pdf>. Acesso em 18 de abr. de 2017.
- Araújo, H.M; Souza, A. C; Costa, J. J; Santos, G. J. (2010) O Clima de Aracaju na Interface com a Geomorfologia de Encostas. *Revista Scientia Plena*, vol. 6, nº8.

- Araújo, H. M. (2006). Encostas no Ambiente Urbano de Aracaju. In: Araújo, H. M.; Vilar, J. W. C.; Wanderley, L. De L.; Souza, R. M. e (Orgs). O ambiente urbano: visões geográficas de Aracaju. São Cristóvão: Departamento de Geografia da UFS.
- Arens, E., Turner, S., Zhang, H., Paliaga, G. (2009). Moving air for comfort. *ASHRAE Journal*, 51(5), 18–28.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International journal of climatology*, 23(1), 1-26.
- Arriitt, R. W. (1993). Effects of the large-scale flow on characteristic features of the sea breeze. *Journal of Applied Meteorology*, 32(1), 116-125.
- ASHRAE Standard 55. (2004). *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta, GA: American Society of Heating,
- Atkinson B.W. (1981). *Meso-scale atmospheric circulations*. Academic Press, London, p. 495.
- Atkinson, R. W. et al. (2001). “Acute Effects of Particulate Air Pollution on Respiratory Admissions: ReSults from APHEA 2 Project.” *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 164(10 I):1860–66.
- Azorin-Molina, C., Chen, D., Tijm, S., Baldi, M. (2011). A multi-year study of sea breezes in a Mediterranean coastal site: Alicante (Spain). *International Journal of climatology*, 31(3), 468-486.
- Azorin-Molina, C., Chen, D., Tijm, S., Baldi, M. (2011). A multi-year study of sea breezes in a Mediterranean coastal site: Alicante (Spain). *International Journal of climatology*, 31(3), 468-486.
- Baca, M. (Ed.) (2008). Introduction to Metadata: Online Edition, Version 3.0. Disponível em: <<http://www.getty.edu/publications/intrometadata>>. Acesso em: 20 de novembro de 2016.
- Baltazar, S. (2014). New Bioclimatic Maps of Lisbon. *Finisterra*, XLIX(98), 81–94.
- Barreto, A. B., Aragão, M. R. S., Braga, C. C. (2002). Estudo do ciclo diário do vento à superfície no Nordeste do Brasil. In Congresso Brasileiro de Meteorologia (Vol. 12, pp. 469-479).
- Barros, H. R., Lombardo, M. A. (2013). Zoneamento climático urbano da cidade do Recife: uma contribuição ao planejamento urbano. GEOUSP: Espaço e Tempo (Online), (33), 186-197.
- Baumüller, J., (2015). A Summary of Key Methodologies. In E. Ng, C. Ren, *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*, Routledge, New York: Routledge.
- Baumüller, J., Hoffmann, U. Reuter, U. (1992). Climate Booklet for Urban Development. Stuttgart: Ministry of Economy Baden-Wuerttemberg (Wirtschaftsministerium). Environmental Protection Department (Amt für Umweltschutz).
- Baumüller, J., Reuter, U., Hoffmann, U., Esswein, H. (2008). Klimaatlas Region Stuttgart. Verband Region Stuttgart, No. 26. Stuttgart: Verband Region Stuttgart. http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_klimaatlas_region (Acesso em 2 mar 2017).

- Bechtel, B., Alexander, P. J., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., Stewart, I. (2015). Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 199-219.
- Bechtel, B., Daneke, C. (2012). Classification of local climate zones based on multiple earth observation data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4), 1191-1202.
- Benson, P.E. (1989). "A Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Concentrations near Roadways." FHWA/CA/TL-84/15, California Department of Transportation, Sacramento.
- Bhatia, R., Rivard, T. (2008). *Assessment and Mitigation of Air Pollutant Health Effects from Intra-urban Roadways: Guidance for Land Use Planning and Environmental Review*. Draft, Program on Health, Equity, Sustainability, Occupational/Environmental Health Section, Department of Public Health, City and County of San Francisco.
- Bhatia, R., Thomas, R. (2008). "Assessment and Mitigation of Air Pollutant Health Effects from Intra-Urban Roadways : Guidance for Land Use Planning and Environmental Review." *Draft, Program on Health, Equity, Sustainability, Occupational/Environmental Health Section, Department of Public Health, City and County of San Francisco*.
- Bigot, S., Planchon, O. (2003). Identification and characterization of sea breeze days in northern France using singular value decomposition. *International journal of climatology*, 23(11), 1397-1405.
- Bitan, A. (1992). The high climatic quality of the future. *Atmospheric Environment*, 26B, 3, 313-329.
- Borne, K., Chen, D., Nunez, M. (1998). A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. *International Journal of Climatology*, 18(8), 901-914.
- Bowers, L. A. (2004). The effect of sea surface temperature on sea breeze dynamics along the coast of New Jersey. Graduate School-New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey, USA: New Brunswick
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning*, 97(3), 147-155.
- Bradshaw, V. (2010). *The building environment: Active and passive control systems*. John Wiley & Sons.
- Brandão, A.M. (2001). Clima Urbano e Enchentes na Cidade do Rio de Janeiro. In. *Impactos Ambientais Urbanos no Brasil*. GUERRA & CUNHA. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil.
- Brazil, J. L. S (2016). Eventos pluviais extremos e risco de inundações na cidade de Aracaju/SE. 106p. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Sergipe.
- Briant, R., C. Seigneur, M. Gadrat, and C. Bugajny. (2013). "Evaluation of Roadway Gaussian Plume Models with Large-Scale Measurement Campaigns." *Geoscientific Model Development* 6(2):445–56.

- Brunekreef, B., Janssen, N. A., de Hartog, J., Harssema, H., Knape, M., Vliet, P. (1997). Air pollution from truck traffic and lung function in children living near motorways. *Epidemiology*, 298-303.
- Bruse, M. (2004). Updated overview over envi-met 3.0. Technical report, University of Bochum, ver: www.envi-met.com. (Acesso em 12 de dez 2106)
- Bruse, M., Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, 13, 373–384.
- Burian, S. J., Brown, M. J., Linger, S. P. (2002). Morphological analyses using 3D building databases: Los Angeles, California. Rep. LA-UR-02, 781.
- California Department of Transportation (Caltrans) (1989). CALINE4 – A dispersion model for predicting air pollutant concentrations near roadways. CA: Division of New Technology and Research.
- Camilloni, I., Barrucand, M. (2012). Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(1–2), 47–58. <http://doi.org/10.1007/s00704-011-0459-z>
- Chang, C. R., Li, M. H., Chang, S. D. (2007). A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 80(4), 386-395.
- Chen, L., Ng, E. (2011). Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(4), 586-594.
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., He, Z. (2012). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 32, 121–136.
- Chow, Judith C. et al. (2006). “Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines That Connect.” *Journal of the Air Waste Management Association* 56(10):1368–80.
- Clancy, R.M.; Thompson, J.D. Hurlburt, H.E.; Lee, J.O. (1979). A model of mesoscale air-sea interaction in a sea breeze-coastal upwelling region. *Mon. Wea. Rev.* 107: 1476-505.
- Coelho, M. C., Tiago L. F., Nagui M. R. (2005a). “A Methodology for Modelling and Measuring Traffic and Emission Performance of Speed Control Traffic Signals.” *Atmospheric Environment* 39(13):2367–76.
- Coelho, M. C., Tiago L. F., Nagui M. R. (2005b). “Impact of Speed Control Traffic Signals on Pollutant Emissions.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 10(4):323–40.
- Coensel, B., A. Can, B., Degraeuwe, I. De Vlieger, D. Botteldooren. (2012). “Effects of Traffic Signal Coordination on Noise and Air Pollutant Emissions.” *Environmental Modelling Software* 35(2012):74–83.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB) (2008). Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2007. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental,
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. Resolução nº 01 de 8 de março de 1990a. Brasília: DOU de 28/12/1990

- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. Resolução nº 18 de 6 de maio de 1986a. Brasília: DOU de 17/06/1986.
- Craig, M. R., Dudley B. C. (2006). A satellite-derived climatology of global ocean winds, *Remote Sensing of Environment*, Volume 105, Issue 3, 15, p.221-236.
- Damato, F., Planchon, O., Dubreuil, V. (2003). A remote-sensing study of the inland penetration of sea-breeze fronts from the English Channel. *Weather*, 58(6), 219-226.
- Danni-Oliveira, I.M (1999). A cidade de Curitiba/PR e a poluição do ar. Implicações de seus atributos urbanos e geocológicos na dispersão de poluentes em período de inverno. São Paulo, 330p. Tese (Doutorado) USP.
- Dapper, S. N., Spohr, C., Zanini, R. R (2016). Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. *Estudos Avançados*, 30(86), 83-97.
- Davenport, A.G., Grimmond, C.S.B., Oke, T. R., Wieringa, J. (2000). Estimating the roughness of cities and sheltered country. *Proceedings 12th Conference on Applied Climatology*, Asheville, NC, American Meteorological Society, Boston, pp. 96-99.
- De Dear R., Pickup, J. (2000). An Outdoor Thermal Environment Index (OUT_SET*) - Part II - Applications. In: De Dear R, Kalma J, Oke T, Auliciems A (eds.) *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium*. Selected Papers from the Conference ICB-ICUC'99 (Sydney, 8–12 November 1999). WMO, Geneva, WCASP-50, pp 258–290
- Dimoudi, A., Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings*, 35(1), 69-76.
- Diniz, A. G., Hamacher, C., Wagener, A. D. L., Gonzalez-Rodriguez, E. (2003). Is copper an inhibiting fator for primary production in the upwelling waters of Cabo Frio? *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 14(5), 815-821
- Dockery, D. W. C. A. Pope. (1994). “Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution.” *Annual Review of Public Health* 15(1):107–32.
- Doick, K. J., Hutchings, T. (2013). Air temperature regulation by urban trees and green infrastructure. Forestry Commission.
- Elen, Bart et al. (2013). “The Aeroflex: A Bicycle for Mobile Air Quality Measurements.” *Sensors (Basel, Switzerland)* 13(1):221–40.
- Eliasson, I. (2000). The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 48, pp. 31–44.
- Emmanuel, R. (2016). Achieving thermal pleasure in tropical urban outdoors. In: *Urban Climate Challenges in the Tropics: Rethinking Planning and Design Opportunities* (pp. 31-47).
- Emmanuel, R., Johansson, E. (2006). Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: the case of Colombo, Sri Lanka. *Climate research*, 30(3), 189-200.
- Emmanuel, R., Johansson, E. (2006). Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: the case of Colombo, Sri Lanka. *Climate research*, 30(3), 189-200.

- Emmanuel, R., Krüger, E. (2012). Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. *Building and Environment*, 53, 137-149.
- Emmanuel, R., Rosenlund, H., Johansson, E. (2007). Urban shading—a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Climatology*, 27(14), 1995-2004.
- EPA, US. (1995). "CAL3QHC Version2.0a Modeling Methodology for Predicting Pollutant Concentrations near Roadway Intersections." EPA-454/R-92-005, US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Standards, Research Triangle Park, NC.
- Fanger, P. O., Hojbjerg, J., Thomsen, J. O. (1974). Thermal comfort conditions in the morning and in the evening. *International Journal of Biometeorology*, 18(1), 16–22.
- Fanger, P.O. (1972). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Fehrenbach, U., Scherer, D. Parlow, E. (2001). Automated classification of planning objectives for the consideration of climate and air quality in urban and regional planning for the example of the region Basel/Switzerland. *Atmospheric Environment*, 35(32): 5605–5615.
- Fenger, J. (1999). "Urban Air Quality." *Atmospheric Environment* 33(29):4877–4900.
- Ferreira et. al., (2009). Vórtices ciclônicos de altos níveis que atuam na vizinhança do Nordeste do Brasil. In: Cavalcanti, I. F. (ed). *Tempo e clima no Brasil*. Oficina de textos.
- Fiebrich, C. A., Morgan, C. R., McCombs, A. G., Hall Jr, P. K., McPherson, R. A. (2010). Quality assurance procedures for mesoscale meteorological data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(10), 1565-1582.
- Fiebrich, C. A., Morgan, C. R., McCombs, A. G., Hall, P. K., McPherson, R. A. (2010). Quality Assurance Procedures for Mesoscale Meteorological Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(10), 1565–1582.
- Figuerola, P. I., Mazzeo, N. A. (1998). Urban-rural temperature differences in Buenos Aires. *International Journal of Climatology*, 18(15), 1709-1723.
- Franchito, S. H., Oda, T. O., Rao, V. B., Kayano, M. T. (2008) Interaction between coastal upwelling and local winds at Cabo Frio, Brazil: an observational study. *J Appl Meteorol Climatol* 47:1590–1598
- Freitas ED, Rozoff CM, Cotton WR, Silva Dias PL. (2007). Interactions of urban heat island and sea breeze circulations during Winter over the Metropolitan Area of São Paulo – Brazil. *Bound. Lay. Meteorol.* 122: 43–65.
- Freitas, E. D., Rozoff, C. M., Cotton, W. R., Dias, P. L. S. (2007). Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. *Boundary-Layer Meteorology*, 122(1), 43-65.
- Furberg, M., Steyn, D. G., Baldi, M. (2002). The climatology of sea breezes on Sardinia. *International Journal of Climatology*, 22(8), 917-932.
- Gál T, Unger J, (2009). Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Building and Environment* 44, 198-206.

- Gál, T., Unger, J. (2014a). A new software tool for SVF calculations using building and tree-crown databases. *Urban Climate*, 10, 594-606.
- García, F. F. (1995). *Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación*. Síntesis. Editorial, Madrid, Spain.
- Gedzelman, S. D., Austin, S., Cermak, R., Stefano, N., Partridge, S., Quesenberry, S., Robinson, D. A. (2003). Mesoscale aspects of the urban heat island around New York City. *Theoretical and Applied Climatology*, 75(1), 29-42.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. Van Nostrand Reinhold: New York.
- Gokhale, S., Namita, R. (2008). "Performance Evaluation of Air Quality Models for Predicting MP10 and MP2.5 Concentrations at Urban Traffic Intersection during Winter Period." *Science of the Total Environment* 394(1):9–24.
- Gomez-Muñoz, V. M., Porta-Gándara, M. A., Fernández, J. L. (2010). Effect of tree shades in urban planning in hot-arid climatic regions. *Landscape and Urban Planning*, 94(3), 149-157.
- Gouveia, N., Freitas, C. U. D., Martins, L. C., Marcilio, I. O. (2006). Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no Município de São Paulo, Brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, 22(12), 2669-2677.
- Graham, E. (1993). The Urban Heat Island of Dublin City During the Summer Months. *Irish Geography*, 26(1), 45–57.
- Grimmond CSB et al., (2010). Climate More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environmental Science*, 1, 247-274.
- Grimmond, C. S. B. (2006). Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1-3): 3-22.
- Grimmond, C. S. B. (2013). Observing London: Weather data needed for London to thrive. London: London Climate Change Partnership, Report.
- Grimmond, C. S. B., Oke, T. R. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of applied meteorology*, 38(9), 1262-1292.
- Gulyás, Á., Unger, J., Matzarakis, A. (2006). Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: Modelling and measurements. *Building and Environment*, 41(12), 1713–1722.
- Gurjar, B. R., T. M. Butler, M. G. Lawrence, and J. Lelieveld. (2008). "Evaluation of Emissions and Air Quality in Megacities." *Atmospheric Environment* 42(7):1593–1606.
- Guttikunda, S. K. Giuseppe. (2013b). "A GIS Based Emissions Inventory at 1 Km × 1 Km Spatial Resolution for Air Pollution Analysis in Delhi, India." *Atmospheric Environment* 67(2013):101–11.
- Guttikunda, S. K., Bilkis A. B., Zia, W. (2013a). "Particulate Pollution from Brick Kiln Clusters in the Greater Dhaka Region, Bangladesh." *Air Quality, Atmosphere and Health* 6(2):357–65.
- Guttikunda, S. K., Rahul, G. (2013c). "Health Impacts of Particulate Pollution in a Megacity-Delhi, India." *Environmental Development* 6(1):8–20.
- Heisler, G. M. (1990). Mean wind speed below building height in residential neighborhoods with different tree densities. *ASHRAE Transactions*. 96(1): 1389-1396.

- Heisler, G. M., Brazel, A. J. (2010). The urban physical environment: Temperature and urban heat islands. *Urban ecosystem ecology*, 29-56.
- Hinkel, K. M.; Nelson, F. E. (2007) Anthropogenic heat island at Barrow, Alaska, during winter: 2001-2005. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 112, n. 6, p. 2001–2005.
- Hirashima, S. Q. S. (2014). Percepção sonora e térmica e avaliação de conforto em espaços urbanos abertos do município de Belo Horizonte - MG, Brasil. Tese de Doutorado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/T.16.2014.tde-23062015-172738. Recuperado em 2016-08-29, de www.teses.usp.br (Acesso em 24 nov 2016).
- Holanda, S. C. (2003). Análise estatística dos ventos mais intensos em Maceió - AL para o ano de 1996 e situações sinóticas correlatas. Maceió. UFAL/CCEN, Dissertação (Mestrado em Meteorologia).
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of Biometeorology*, 43(2), 71-75.
- Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 34(6), 661–665.
- Höppe, P. R. (1993). Heat balance modelling. *Experientia* 49:741–745.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. População estimada 2016. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=codmun=280030&search=sergipe|aracaju>>. (Acesso em 6 mar. 2017).
- IPCC (2007) Fourth Assessment Report: Climate Change. https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch3s3-2-2-2.html. (Acesso 5 mar, 2017).
- Jauregui, A., Tejeda, A. (1997) Urban-rural humidity contrasts in Mexico city. *International Journal of Climatology*, 17, pp. 187-196.
- Jauregui, E. (1990/1991). Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city. *Energy and buildings*, 15(3), 457-463.
- Jendritzky, G., de Dear, R., Havenith, G. (2012). UTCI-Why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421–428.
- Jerrett, Michael et al. (2005). “A Review and Evaluation of Intraurban Air Pollution Exposure Models.” *Journal of exposure analysis and environmental epidemiology* 15(2):185–204.
- Kanda, M. (2006), Progress in the scale modeling of urban climate: *Review. Theor. Appl. Climatol.*, 84, pp. 23–33.
- Katzschner, L. (1993). Urban Climatic Analysis Map for Kassel, City.
- Katzschner, L. (2015). On the issue of scales of urban climatic maps. In E. Ng, C. Ren, *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*, Routledge, New York: Routledge.
- Katzschner, L., Freire, T., Nery, J., Andrade, T., Carvalho, L. (1999). *Urban climate study of Salvador: thermal comfort pattern*. In: V Encontro Nacional e Encontro Latino-Americano Sobre Conforto No Ambiente Construído. Fortaleza: ANTAC.

- Ketterer, C., Matzarakis, A. (2016). Mapping the Physiologically Equivalent Temperature in urban areas using artificial neural network. *Landscape and Urban Planning*, 150, 1–9.
- Khan, B. A., (2010). Sea breeze circulation in the Auckland region: Observational data analysis and numerical modeling. Ph.D. thesis, University of Canterbury, 262 pp. <http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/4476>. (Acesso em 24 jan 2016).
- Kim, Y. H., Baik, J. J. (2004). Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea. *Theoretical and Applied Climatology*, 79(3–4), 151–164.
- Kljun, N., Rotach, M. W., Schmid, H. P. (2002). A three-dimensional backward Lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications. *Boundary-Layer Meteorology*, 103(2), 205–226.
- Koppe C, Kovats S, Jendritzky G, Menne B. (2004). Heat-waves: risks and responses. World Health Organization. Health and Global Environmental Change, Series, No. 2, Copenhagen, Denmark
- Kousky, V. E. (1979). Frontal influences on northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, 107(9), 1140–1153.
- Lake Environmental. (2006). CALRoads View, Air Dispersion Models for Roadways.
- Lawrence, M. G., T. M. Butler, J. Steinkamp, B. R. Gurjar, and J. Lelieveld. (2006). “Regional Pollution Potentials of Megacities and Other Major Population Centers.” *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 6(6):13323–66.
- Lazar, R. Podesser, A. (1999). An urban climate analysis of Graz and its significance for urban planning in the tributary valleys east of Graz (Austrial). *Atmospheric Environment*, 33(24): 4195–4209.
- Lee, S. H., Lee, K. S., Jin, W. C., Song, H. K. (2009). Effect of an urban park on air temperature differences in a central business district area. *Landscape and Ecological Engineering*, 5(2), 183–191.
- Lelovics, E., Unger, J., Gál, T. (2014). Design of an urban monitoring network based on local climate zone mapping and temperature pattern modelling. *Climate Research*, 60, 51–62.
- Lemes, M. A. M., Ferreira, A. D., Rodrigues, L. R. L. (2006). Variabilidade intra-anual do vento para a cidade de Maceió, AL, Brasil, em 2004: Caracterização da brisa. In Congresso Brasileiro de Meteorologia (Vol. 14).
- Lima, E. D., Pinheiro, S. H. D., Marcelino, L. G. (2010). “Uso Do Modelo de Dispersão CAL3QHC Na Estimacão Da Dispersão de Co Na Região Central de Maringá, Estado Do Paraná.” *Acta Scientiarum - Technology* 32(3):261–69.
- Lima, N. R., Pinheiro, G. M., Mendonça, F. (2012). Clima urbano no Brasil: Análise e contribuição da metodologia de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro. *Revista Geonorte*, 3(9), 626–638.
- Lin, S., Jean, P. M., Syni-An H., Edward, F., Michael, R. C. (2002). “Childhood Asthma Hospitalization and Residential Exposure to State Route Traffic.” *Environmental research* 88(2):73–81.
- Lin, T. P. (2009). Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. *Building and environment*, 44(10), 2017–2026.

Referências

- Lin, T. P., Matzarakis, A., Hwang, R. L. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 45(1), 213-221.
- Lindqvist, S. Mattsson, J. (1989). Topoclimatic maps for different planning levels – some Swedish examples. *Building Research and Practice*, 17(5): 299–304.
- Litman, T. (2010). Well measured: Developing indicators for sustainable and livable transport planning, Tech. report, Victoria Transport Policy Institute.
- Lombardo, M. A. (1997). Estudios interdisciplinarios, metodologías e técnicas de análise do clima urbano. CD del VI Encuentro de Geógrafos de América Latina, Buenos Aires, Argentina.
- Lombardo, M.A. (1985). Ilha de Calor nas Metrôpoles: o exemplo de São Paulo. HUCITEC, 244p.
- Lombardo, M.A. (1985). *Ilhas de Calor nas Metrôpoles: o exemplo de São Paulo*. São Paulo: HUCITEC, 244 p.
- Lopes A, Correia, E. (2012) A Proposal to Enhance Urban Climate Maps with the Assessment of the Wind Power Potential. The Case of Cascais Municipality (Portugal). In Lenka Hájková et al Ed., Conference Proceedings da International Scientific Conference “Bioclimate 2012 – Bioclimatology of Ecosystems, Ústí nad Labem: 68-69.
- Lopes, A. (2003). *Modificações no Clima de Lisboa como Consequência do Crescimento Urbano. Vento, Ilha de Estresse térmico de Superfície e Balanço Energético*. Tese de Doutorado em Geografia Física, apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.
- Lopes, A., Alves, E., Alcoforado, M. J., Machete, R. (2013). Lisbon Urban Heat Island Updated: New Highlights about the Relationships between Thermal Patterns and Wind Regimes. *Advances in Meteorology*, 2013, 1–11.
- Lopes, A., Lopes, S., Matzarakis, A., Alcoforado, M. J. (2012). The influence of the summer sea breeze on thermal comfort in Funchal (Madeira). A contribution to tourism and urban planning. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(5), 553–564.
- Lopes, S. S. (2015). *Clima e ordenamento do território no Funchal*. Tese de doutoramento, Geografia (Geografia Física), Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, p.428. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/22719> (Acesso em 5 mar. 2017).
- Mahrer, Y., Pielke, R. A. (1977). The effects of topography on sea and land breezes in a two-dimensional numerical model. *Monthly weather review*, 105(9), 1151-1162.
- Marques, D. (2012). *Contributo da Climatologia para a sustentabilidade urbana. O caso da Figueira da Foz*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra (Portugal), 193 p.
- Martins, L. C., Cardoso, M. R. A., Gonçalves, F. L. T., Saldiva, P. H. N., Braga, A. L. F. (2002). Poluição atmosférica e atendimentos por pneumonia e gripe em São Paulo, Brasil. *Revista de Saúde Pública*, 36(1), 88-94.
- Martin-Vide, J., Sarricolea, P., Moreno-García, M. C. (2015). On the definition of urban heat island intensity: the “rural” reference. *Frontiers in Earth Science*, 3, 24.

- Matzarakis A, Mayer H. (1992). *Mapping of urban air paths for planning in Munchen*. Wissenschaftliche Berichte Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Univ. Karlsruhe;16:13–22.
- Matzarakis, A. and Mayer, H. (1992). Mapping of urban air paths for planning in Munich. *Wiss. Ber. Inst. Meteor. Klimaforsch.* Univ. Karlsruhe, 16: 13–22.
- Matzarakis, A., Mayer, H., Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76–84.
- Matzarakis, A., Rudel, E., Zygmuntowski, M., Koch, E. (2010). Bioclimatic maps for tourism purposes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(1), 57-62.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments--application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 51(4), 323–34.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 54(2), 131–9.
- Mayer, H., Matzarakis, A. (1998). Human-biometeorological assessment of urban microclimates' thermal component. In Proceedings 2nd Japanese-German Meeting “Klimaanalyse für die Stadtplanung”. Research Centre for Urban Safety and Security, Kobe University. Special rep (Vol. 1, pp. 155-168).
- McConnell, Rob et al. (2006). “Traffic, Susceptibility, and Childhood Asthma.” *Environmental Health Perspectives* 114(5):766–72.
- Melo, J. D. (2009) Climate characterization of the city of Maceió as contribution to planning decisions. 157 f. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
- Mendonça, F. (2012). O Estudo do S.C.U. - Sistema Clima Urbano - No Brasil: Aplicações e Avanços.
- Mendonça, F.A. (1997). O Clima e o Planejamento Urbano de cidades de porte médio e pequeno-proposição metodológica para estudo e sua aplicação à cidade de Londrina-PR. Tese de Doutorado em Geografia USP, 300p.
- Middel, A., Häb, K., Brazel, A. J., Martin, C. A., Guhathakurta, S. (2014). Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 122, 16-28.
- Miller, S. T. K., Keim, B. D., Talbot, R. W., Mao, H. (2003). Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts. *Reviews of geophysics*, 41(3).
- Mills, G. (2006). Progress toward sustainable settlements: a role for urban climatology. *Theoretical and Applied Climatology* 84, pp. 69–76.
- Mills, G., Anjos, M., Brennan, M., Williams, J., McAleavey, C., Ningal, T. (2015). The green ‘signature’ of Irish cities: An examination of the ecosystem services provided by trees using i-Tree Canopy software. *Irish Geography*, 48(2), 62-77.
- Mills, G., J. Ching, L. See, B. Bechtel, M. Foley, (2015). An Introduction to the WUDAPT project. *9th International Conference on Urban Climate*, Toulouse.

- Miranda, Regina Maura et al. (2012). “Urban Air Pollution: A Representative Survey of MP2.5 Mass Concentrations in Six Brazilian Cities.” *Air Quality, Atmosphere Health* 5(1):63–77.
- Mishra, V. K., Padmanabhamutry. B. (2003). “Performance Evaluation of CALINE3, CAL3QHC and PART5 in Predicting Lead Concentration in the Atmosphere over Delhi.” *Atmospheric Environment* 37(22):3077–89.
- Mitraka, Z., Del Frate, F., Chrysoulakis, N., Gastellu-Etchegorry, J. P. (2015). Exploiting Earth Observation data products for mapping Local Climate Zones. In *Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 2015 Joint (pp. 1-4). IEEE.
- Mizzi, A. P., Pielke, R. A. (1984). A numerical study of the mesoscale atmospheric circulation observed during a coastal upwelling event on 23 August 1972. Part I: Sensitivity studies. *Monthly weather review*, 112(1), 76-90
- Mohan M., Siddiqui T.A. (1998) Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification. *Atmospheric Environment*, v. 32, n. 21: p. 3775-3781.
- Monteiro, C.A, Mendonça, F. (2003).Clima Urbano. Contexto.
- Monteiro, C.A.F. (1976).Teoria e Clima Urbano. São Paulo:IGEOC-USP, 181p.
- Monteiro, L. M. (2008). *Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos*. 378p. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo
- Monteiro, L. M.; Alucci, M. P. (2007). Conforto térmico em espaços abertos com diferentes abrangências microclimáticas. Parte 2: proposição de calibração de modelos preditivos. In: VIII Encontro Nacional e V Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, Ouro Preto. Anais... ANTAC.
- Morris, C. J. G., Simmonds, I., Plummer, N. (2001). Quantification of the influences of wind and cloud on the noturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology*, 40(2), 169-182.
- Moura, T., Nery, J., Andrade, T., Katzschnner, L. (2008). Mapeando as condições de conforto térmico em Salvador. *Revista de Urbanismo e Arquitetura*, 7(1).
- Moura, T., Nery, J., Andrade, T., Katzschnner, L. (2008). Mapeando as condições de conforto térmico em Salvador. *Revista de Urbanismo e Arquitetura*, 7(1).
- Muller, C. L., ChaMPan, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T., Cai, X. (2013a). Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1585–1600. doi:10.1002/joc.3678
- Muller, C. L., ChaMPan, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T., Cai, X.-M. (2013b). Toward a Standardized Metadata Protocol for Urban Meteorological Networks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8), 1161–1185.
- National Research Council of the National of the Academies. (2012). Urban Meteorology: Forecasting , Monitoring , and Meeting Users ’ Needs.
- Nery, J., Andrade, T., Moura, T. (2008). Conforto térmico em Salvador: o índice PET e sua abordagem projetual. *Revista de Urbanismo e Arquitetura*, 7(1).

- Neto, J. L. S. A. (2011). O clima urbano como construção social: da vulnerabilidade polissêmica das cidades enfermas ao sofisma utópico das cidades saudáveis. *Revista Brasileira de Climatologia*, 8.
- Newman, Nicholas C. et al. (2014). "Traffic-Related Air Pollution and Asthma Hospital Readmission in Children: A Longitudinal Cohort Study." *Journal of Pediatrics* 164(6):1–8.
- Ng E, Katzschner L, Wang U, Ren C, Chen L. (2008). *Working Paper No. 1ª: draft urban climatic analysis map – urban climatic map and standards for wind environment – feasibility study*. Technical Report for Planning Department HKSAR. The Chinese University of Hong Kong: Hong Kong.
- Ng, E. (2009a). *Designing High-Density Cities for Social and Environmental Sustainability*. London: Earthscan.
- Ng, E. (2009b). Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – Air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. *Building and Environment*, 44(7): 1478–1488.
- Ng, E., Ren, C., (2015) *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*, Routledge, New York: Routledge.
- Nicol, J. F., Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and buildings*, 34(6), 563-572.
- NISO - National Information Standards Organization (2004). Understanding Metadata. Disponível em:
<<http://www.niso.org/publications/press/UnderstandingMetadata.pdf>>. Acesso em: 20 de novembro de 2016
- Nowak, D. J., Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental pollution*, 116(3), 381-389.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban forestry urban greening*, 4(3), 115-123.
- Oke T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Oke T. R. (2009). The need to establish protocols in urban heat island work. Paper presented at the 8th Symposium on Urban Environments, Phoenix, Arizona, 12–15 January.
- Oke T. R., Hannell, F. G. (1970). The form of the urban heat island in Hamilton, Canada (Vol. 108, pp. 113-126). WMO Tech Note 108:113–126
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 7, 769–779. (73)90140-6
- Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14(4), 268-277.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Oke, T. R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical geography*, 12(4), 471-508.
- Oke, T. R. (2006a). Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites: Report n. 81, WMO/TD, n. 1250. Geneva: World Meteorological Organization. Report.

- Oke, T. R. (2006b). Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 84, n. 1-3, p. 179–190.
- Oke, T. R., Maxwell, G. B. (1975). Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment* (1967), 9(2), 191-200.
- Oke, T. R., Taesler, R., Olsson, L. E. (1991). The tropical urban climate experiment (TRUCE). *Energy and buildings*, 15(1), 67-73.
- Oke, T.R. (1984). Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energ. Build.* 7 (1), pp. 1–10.
- Oke, T.R. (1994). Keynote address to the technical conference on tropical urban climate (TeCTUC). WMO/TD 647, pp. 23-27.
- Oliveira, S., Andrade, H., Vaz, T. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment*, 46(11), 2186–2194.
- Olmo, N., Regina, S. et al. (2011). “A Review of Low-Level Air Pollution and Adverse Effects on Human Health: Implications for Epidemiological Studies and Public Policy.” *Clinics (Sao Paulo, Brazil)* 66(4):681–90.
- Ostro, B., Rachel, B., Shelley, G., Wen, Y. F., Michael, L. (2006). “Fine Particulate Air Pollution and Mortality in Nine California Counties: ReSults from CALFINE.” *Environmental Health Perspectives* 114(1):29–33.
- Papanastasiou, D. K., Melas, D. (2009). Climatology and impact on air quality of sea breeze in an urban coastal environment. *International Journal of Climatology*, 29(2), 305-315.
- Papanastasiou, D. K., Melas, D., Bartzanas, T., Kittas, C. (2010). Temperature, comfort and pollution levels during heat waves and the role of sea breeze. *International Journal of Biometeorology*, 54(3), 307–17.
- Papanastasiou, D. K., Melas, D., Thomas, B., Constantinos, K. (2010). “Temperature, Comfort and Pollution Levels during Heat Waves and the Role of Sea Breeze.” *International journal of biometeorology* 54(3):307–17.
- Parlow, E., Scherer, D. Fehrenbach, U. (2001a). Climatic Analysis Map for Grenchen und Umgebung, CAMPAS, Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten für den Kanton Solothurn. Basel, Switzerland.
- Partners for Livable Communities. (2009). What is livability? <http://livable.org/about-us/what-is-livability> (Acesso em 2 jan 2017).
- PBMC, 2014: Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp.
- Perez, G. M. P. and Silva Dias, M. A. F. (2017), Long-term study of the occurrence and time of passage of sea breeze in São Paulo, 1960–2009. *International Journal of climatology*. doi:10.1002/joc.5077
- Perez, G. M., Silva Dias, M. A. (2017). Long-term study of the occurrence and time of passage of sea breeze in São Paulo, 1960–2009. *International Journal of Climatology*.
- Peters, J. (2013). “Monitoring MP10 and Ultrafine Particles in Urban Environments Using Mobile Measurements.” *Aerosol and Air Quality Research* 509–22.

- Petralli, M.; Massetti, L.; Orlandini, S. (2010). Five years of thermal intra-urban monitoring in Florence (Italy) and application of climatological indices. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 104, n. 3-4, p. 349–356.
- Planchon, O., Damato, F., Dubreuil, V., Gouéry, P. (2006). A method of identifying and locating sea-breeze fronts in north-eastern Brazil by remote sensing. *Meteorological Applications*, 13(3), 225-234.
- Pope, C., Arden. et al. (1995). “Particulate Air Pollution as a Predirtor of Mortality in a Prospertive Study of U . S . Adults.” *American Journals of Respiratory Critical Care Medicine* 151:669–74.
- Potchter, O., Cohen, P., Bitan, A. (2006). Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, 26(12), 1695-1712.
- Qian, T., Epifanio, C. C., Zhang, F. (2012). Topographic effects on the tropical land and sea breeze. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(1), 130-149.
- Rees, W. & Wackernagel, M. (1996) Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable– and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Rev.*, 16(4–6), pp. 223–248.
- Ren, C. (2015). A Review of the hisorical develoMPent of urban climatic map study. In: Ng, E., Ren, C. (Eds.). *The urban climatic map: a methodology for sustainable urban planning*. Routledge.
- Ren, C., Wang, R., Cai, M., Xu, Y., Zheng, Y. Ng, E. (2016). The Accuracy of LCZ maps Generated by the World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) Method: A Case Study of Hong Kong, in *The Fourth International Conference on Countermeasure to Urban Heat Islands (4th IC2UHI)*.
- Ribeiro, C. A. M. (2013) Atualização e aprofundamento do mapa de análises climáticas do município de João Pessoa - Paraíba. 2013. 159 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal da Paraí-ba, João Pessoa.
- Ribeiro, F. N. D., Soares, J., Oliveira, A. P. D. (2011). The co-influence of the sea breeze and the coastal upwelling at Cabo Frio: a numerical investigation using coupled models. *Brazilian Journal of Oceanography*, 59(2), 131-144.
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., Chunho, L. I. U. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120-128.
- Ross, Z., Michael, J-, Kazuhiko, I., Barbara, T., George, D. T. (2007). “A Land Use Regression for Predicting Fine Particulate Matter Concentrations in the New York City Region.” *Atmospheric Environment* 41(11):2255–69.
- Roth, M. (2000). Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(564), 941-990.
- Roth, M. (2007). Review of urban climate research in (sub) tropical regions. *International Journal of Climatology*, 27(14), 1859-1873.
- Rue, H., Rooney, K., Dock, S., Ange, K., Twaddell, H., & Poncy, A. (2011). The role of FHWA programs in livability. Retrieved from http://www.fhwa.dot.gov/livability/state_of_the_practice_summary/research2011.pdf; Acesso: 5 de Março, 2012.

- Sailor, D. J., Lu, L. (2004). A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric environment*, 38(17), 2737-2748.
- Saito, I., Ishihara, O., Katayama, T. (1991). Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area. *Energy and Buildings*, 15(3), 493-498.
- Saldiva, P. H. N. et al. (1994). "Association between Air Pollution and Mortality Due to Respiratory Diseases in Children in São Paulo, Brazil: A Preliminary Report." *Environmental Research* 65(2):218–25.
- Samet, J. M., Francesca, D., Frank, C. Curriero, I. C., Scott L. Z. (2000). "Fine Particulate Air Pollution and Mortality in 20 U.S. Cities, 1987–1994." *New England Journal of Medicine* 343(24):1742–49.
- Samson, P.J. (1988). "Atmospheric Transport and Dispersion of Air Pollutants Associated with Vehicular Emissions." National Academy of Sciences.
- Sánchez-Ccoyllo, Odón R. et al. 2009. "Vehicular Particulate Matter Emissions in Road Tunnels in Sao Paulo, Brazil." *Environmental Monitoring and Assessment* 149(1–4):241–49.
- Sant’Anna Neto, J. L.. (2011). O clima urbano como construção social: da vulnerabilidade polissêmica das cidades enfermas ao sofisma utópico das cidades saudáveis. *Revista Brasileira de Climatologia*, 8.
- Santos, A; Araújo, H. M (2014) Análise dos riscos geomorfológicos e hidrológicos do município de Aracaju. VI Congresso Iberoamericano de Estudios Territoriales e Ambientales. São Paulo.
- Santos, B. F. (2016). Urbanização e clima urbano do bairro Atalaia na cidade de Aracaju/SE. 2016. 142 f. Dissertação (Pós-Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.
- Scherer, D.; Fehrenbach, K.; Beha, H.-D.; Parlow, E. (1999). Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment*, 33: 4185-4193
- Schmitt, Gerhard N. (2015). Information cities. Zurich - Singapore. ETH Zürich.
- See, L. et al. (2015). Generating WUDAPT’s Specific Scale-dependent Urban Modeling and Activity Parameters: Collection of Level 1 and Level 2 Data. In: *Proceedings of the ICUC9*. Meteo France, Toulouse, France.
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., Erell, E. (2011). The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1498–1506.
- Shimomura, A.R.P., Lopes, A., Correia, E. (2015). Urban climatic map studies in Brazil: Campinas. In: Ng, E., Ren, C. (Eds.). *The urban climatic map: a methodology for sustainable urban planning*. Routledge.
- Silva, J. F., Ferreira, H. S., Santos, M. O. (2016). Considerações sobre os estudos em clima urbano | Considerations studies on urban climate. *Revista Geama*, 2(1), 156-170.
- Simpson, J. E., Mansfield, D. A., Milford, J. R. (1977). Inland penetration of sea-breeze fronts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 103(435), 47-76.

Referências

- Simpson, J.E. (1994). *Sea breeze and local wind*. Cambridge University Press, Cambridge, p 234,
- Souza, S.H.M. (2010). Avaliação do desempenho térmico nos microclimas das praças: Piedade e Visconde de Cayrú, Salvador/BA, Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental Urbana da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador,
- Spronken-Smith, R. A., Oke, T. R. (1998). The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International journal of remote sensing*, 19(11), 2085-2104.
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, v. 31, n. 2, p. 200–217.
- Stewart, I. D., Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, n. 12, p. 1879-1900.
- Stock, P. and Beckröge, W. (1991). *Klimaanalyse Stadt Bochum*. Essen: Kommunalverband Ruhrgebiet.
- Tarifa, J.R. Azevedo, T. (2001). Os climas na cidade de São Paulo: teoria e prática. GEOUSP.
- Tavares, F. V. F., Barreto, A. A., Dutra, E. G., Jacomino, V. M. F. (2010). Estudo do processo de dispersão de emissões veiculares em uma microrregião de Belo Horizonte (MG) utilizando simulação numérica. *Eng Sanit Ambient*, 15(4), 315-324.
- Turner, D. B. (1964). "A Diffusion Model for an Urban Area." *Journal of Applied Meteorology* 3(1):83–91.
- Turner, D. B. (1997). "The Long Lifetime of the Dispersion Methods of Pasquill in US Regulatory Air Modeling." *Journal of Applied Meteorology* 36(2):1016–20.
- U.S. Environmental Protection Agency (1995). User's Guide to PART5: A Program for Calculating Particulate Emissions from Motor Vehicles. U.S. EPA, Ann Arbor, Michigan, EPA-AAAQAB-94-02.
- UMPanis, H., Chen, D. (1999). Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban-park temperature differences--a case study of summer 1995 in Göteborg, Sweden. *Climate Research*, 13(2), 125-139.
- Unger, J. (2009). Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *International Journal of Environment and Pollution*, 36, 59.
- Unger, J., Gál, T. M., Csépe, Z., Lelovics, E., Gulyás, Á. (2014b). Development, data processing and preliminary results of an urban human comfort monitoring and information system. *Időjárás/Quarterly Journal of The Hungarian Meteorological Service*.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014): World Urbanization Prospects: The 2014 Revision.
- Upmanis, H., Chen, D. (1999). Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban-park temperature differences--a case study of summer 1995 in Göteborg, Sweden. *Climate Research*, 13(2), 125-139.

Referências

- Valentin, J. L. (1999). Numerical modelling of phytoplankton bloom in the upwelling ecosystem of Cabo Frio (Brazil). *Ecological Modelling*, 116(2), 135-148.
- Van Poppel, M., Peters, J., Bleux, N. (2013). Methodology for setup and data processing of mobile air quality measurements to assess the spatial variability of concentrations in urban environments. *Environmental pollution*, 183, 224-233.
- Varejão-Silva, M. A. (2000). *Meteorologia e Climatologia*. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Brasília.
- VDI (1997). VDI-Standard: VDI 3787 Part 1 Environmental Meteorology – Climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions. Berlin: Beuth Verlag.
- Vemado, F., Pereira Filho, A. J. (2015). Severe weather caused by heat island and sea breeze effects in the Metropolitan Area of Sao Paulo, Brazil. *Advances in Meteorology*.
- Venn, A. J., Sarah A. L., Marie, C., Richard, H., John, B. (2002). “Living near a Main Road and the Risk of Wheezing Illness in Children.” *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 164(12):2177–80.
- Vos, P. E., Maiheu, B., Vankerkom, J., Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: to tree or not to tree? *Environmental pollution*, 183, 113-122.
- Warren, E. L. et al. (2016) The Birmingham Urban Climate Laboratory – A high density, urban meteorological dataset, from 2012–2014. *Scientific Data*, n. 3. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/sdata201638>> (Acesso em 20 de nov 2016).
- WHO (World Health Organization) (2003). *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*. Report on a WHO Working Group Bonn, Germany 13–15 January 2003. Copenhagen: World Health Organization.
- Wilhelmi, O. V, Hayden, M. H. (2010). Connecting people and place: a new framework for reducing urban vulnerability to extreme heat. *Environmental Research Letters*, 5(1), 14021.
- Yan, H., Anthes, R. A. (1987). The effect of latitude on the sea breeze. *Monthly weather review*, 115(5), 936-956
- Yang, X., Li, Y., Luo, Z., Chan, P. W. (2017). The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *International Journal of Climatology*, 37(2), 890-904.
- Yoshikado, H. (1992). Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze. *Journal of Applied Meteorology*, 31(10), 1146-1164.
- Young, E., Hermanson, V. (2013). Livability literature review: synthesis of current practice. In Transportation Research Board 92nd Annual Meeting (No. 13-2940). Washington, DC, USA: National Association of Regional Councils.
- Yu, C., Hien, W. N. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, 38(2), 105-120.
- Yura, E. A., Kear, T., Niemeier, D. (2007). Using CALINE dispersion to assess vehicular MP 2.5 emissions. *Atmospheric Environment*, 41(38), 8747-8757.
- Zanella, M. E, Moura, M. O. (2013). O Clima das cidades do Nordeste brasileiro: contribuições no planejamento e gestão urbana. *Revista da ANPEGE*, v. 9, p. 75-89.
- Zhou, Y., Levy J. I. (2007). Factors influencing the spatial extent of mobile source air pollution impacts: a meta-analysis. *BMC Public Health*. 89: 1-11.

Referências

- Zoras, S., A. G. Triantafyllou, D. Deligiorgi. (2006). “Atmospheric Stability and MP10 Concentrations at Far Distance from Elevated Point Sources in Complex Terrain: Worst-Case Episode Study.” *Journal of Environmental Management* 80(4):295–302.
- Zoulia, I., Santamouris, M., Dimoudi, A. (2009). Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens. *Environmental monitoring and assessment*, 156(1), 275-292.

ANEXO

Metadados da Rede Climatológica Urbana

PARTE1

| | | | |
|--------------------------------|---|---------------------------------------|-----------------------------|
| Rede: ARA-CLIM | Data actualização: 17/07/2014 | Observador: Max Anjos | Versão: 1.0 |
|--------------------------------|---|---------------------------------------|-----------------------------|

1. Informações gerais da rede

| | | |
|---|--|---|
| Código da rede: ARA-CLIM | Autorizada: 17/07/14 | Fechamento: 10/010/16 |
| Responsável: Max Anjos | Email: maxanjos@campus.ul.pt | Tel/cel: +351 910075250 |
| Endereço da sede: Ainda não definido. | | |
| Instituição(ões) envolvida(s): Group Climate Change and Environmental Systems (ZEPHYRUS)/Universidade de Lisboa e Departamento de Geografia da Universidade Federal de Sergipe/Brasil. | | |
| Equipamentos em operação: (2) estações meteorológicas automáticas; (5) Sensores térmicos e (2) sensores termo-higrométo (Dataloggers). | | |
| Tempo de registro dos sensores: a cada 15 minutos | Campanha (tipo) de recolha de dados: (manual) a cada 3 meses | |
| Total de casos: 19.640 | Última atualização: 10/10/2016 | Pontos de observação em operação: 9 |
| Objetivo da rede: avaliar as condições climáticas locais de Aracaju, em especial o fenómeno da Ilha de Calor Urbana e auxiliar na produção de informações climáticas para o planeamento urbano. | | |

2 Especificações dos Equipamentos¹

| Código da Rede | Equipamento | Tipo | Variável (eis) Observada (s) e unidades de medida | Suporte para o sensor/equipamento | Altura acima do solo (m) | Data de Instalação | Data/período da calibração (em relação a estação referência-INMET) | | | |
|-----------------------------|--|----------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|-----------|-------------------|-----------------|
| ARA-MESO | Sensor de temperatura do ar e umidade relativa | HOBO Pro v2 U23-001 | Temperatura do ar (°C) e umidade relativa (%) | Poste de luz | 3.5 e 7 | 17/07/2014 | 04/07 a 16/07/2014 | | | |
| | Protetor solar | -- | -- | Poste de luz | -- | 17/07/2014 | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Sensor de temperatura do ar | | | | | | Sensor de umidade relativa | | | | |
| Limites de funcionamento | | Precisão | Resolução | Tempo de resposta | Estabilidade de No interior | Limites de funcionamento | Precisão | Resolução | Tempo de resposta | Estabilidade de |
| No interior | No exterior | | | | | | | | | |
| -40 a 70°C | -40 a 70°C | ±0.21°C de 0° a 50°C | 0.02°C em 25°C | 1 m/sec | < 0.1°C por ano | 0 a 100% em 40° a 70°C | ±2.5% de 10% a 90% | 0.03% | 1m/sec | <1% por ano |

¹ Informações a partir da fabricante Onset®HOBO Data Loggers.

3. Equipamentos complementares

| Equipamento | Descrição |
|---|--|
| Estação automática padrão do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) | Vaisala, modelo MAWS 301 de fabricação finlandesa (Nota técnica no. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET). |
| Estação automática do Aeroporto de Santa Maria (INFRAERO) | --- |

4. Teste de homogeneidade

| | |
|---|---|
| Elementos meteorológicos testados na homogeneização | - |
| Duração dos períodos | - |
| Escala de tempo (diária, mensal, sazonal ou anual) | - |
| Referência do teste e software utilizado | - |
| Números de registros homogêneos | - |
| Número de heterogeneidades encontradas em cada tempo-série individual | - |
| Variação anual do número de heterogeneidades em cada registro (números de caso por mês) | - |
| Tamanho das heterogeneidades detectadas e os procedimentos de correção utilizados para ajustá-los | - |
| Causas das heterogeneidades detectadas em cada tempo da série | - |

5. Recuperação dos dados

| | |
|---|---|
| Porcentagem de dados preenchidos com as estimativas em uma série temporal | - |
| Fração de dados em falta permitidos no cálculo de médias mensais do elemento de valores diários. | - |
| Os algoritmos utilizados para o cálculo em esquemas de interpolações temporais | - |
| Algoritmos empregados e estações vizinhas utilizadas (número de estações, nomes e detalhes de localização) para cálculos em esquemas de interpolação espacial | - |
| Período de dados para o qual foi realizado o esquema de interpolação | - |

PARTE 2

1. Estação urbana - Jardins

| | | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| Local/Código: Jardins\JAR | Data actualização: 17/07/2014 | Observador: Max Anjos | Versão: 1.0 |
|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------|

1.1 Mapa à escala local (*circulo de influência de 500m a partir do sensor*)




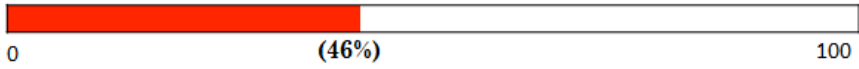

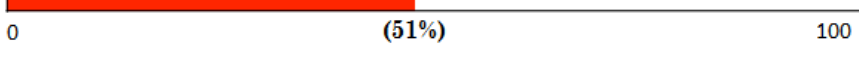


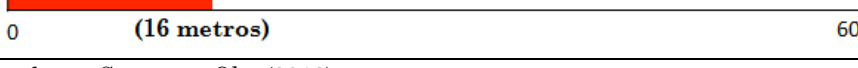
(*circulo de influência microclimática de 100m a partir do sensor*)

1.2 Informações específicas

| | | |
|--|--|----------------------------------|
| Nome da estação: Jardins | Número de série: 10527635 | Autorizada: 19/07/14 |
| Pseudônimo da estação: Marcelo Deda | Código da rede: ARA-CLIM | Fechamento: 10/10/2016 |
| Tipo da estação: Sensor de temperatura | Distância em relação ao mar/rio: 360 metros | Elevação: 5 metros |
| Tipo de local: Espaço aberto entre edifícios elevados (até 9 pavimentos) com presença de vegetação arbórea | Latitude: 10°56'29.21"S | Longitude: 37° 3'12.75"W |
| Endereço: Avenida Jorge Amado, Jardins. | Contato | |
| | Instituição/pessoa*: xxxxxxxxxxxxxxxx | |
| Email*: xxxxxxxxxxxxxxxx | Tel/cel*: xxxxxxxxxxxxxxxx | |

* Informações privadas, não são repassadas aos usuários.

1.3 Classificação térmica

| | |
|---|--|
| Local Climate Zona (LCZ) ¹ : LCZ 4 - (Ocupação aberta e edificações elevadas) Mistura aberta de edifícios altos (+10 pavimentos) e espaçados por edifícios médios (3 a 6 pavimentos). Cobertura do solo pavimentada por asfalto e concreto. Pouca ou nenhuma vegetação (exceto às margens do rio Sergipe e praças urbanas). | |
| <u>Parâmetros</u> | |
| Fator de Visão do Céu |  0 (0.768) 1 |
| Taxa de edificação |  0 (46%) 100 |
| Taxa de vegetação |  0 (12%) 100 |
| Taxa de superfície impermeável |  0 (51%) 100 |
| Comprimento de rugosidade (z ₀) |  0 (1,9 metros) 2.5 |
| Deslocamento do plano zero (z _d) |  0 (20 metros) 30 |
| Altura média dos elementos rugosos (z _H) |  0 (16 metros) 60 |

¹Classificação térmica baseada em Stewart e Oke (2012).

²Fator de Visão do Céu, rugosidade aerodinâmica (Z₀ e Z_d) calculados a partir de (Gál e Unger, 2009, 2014; Unger et al., 2014).

1.4 Uso do solo e materiais de construção

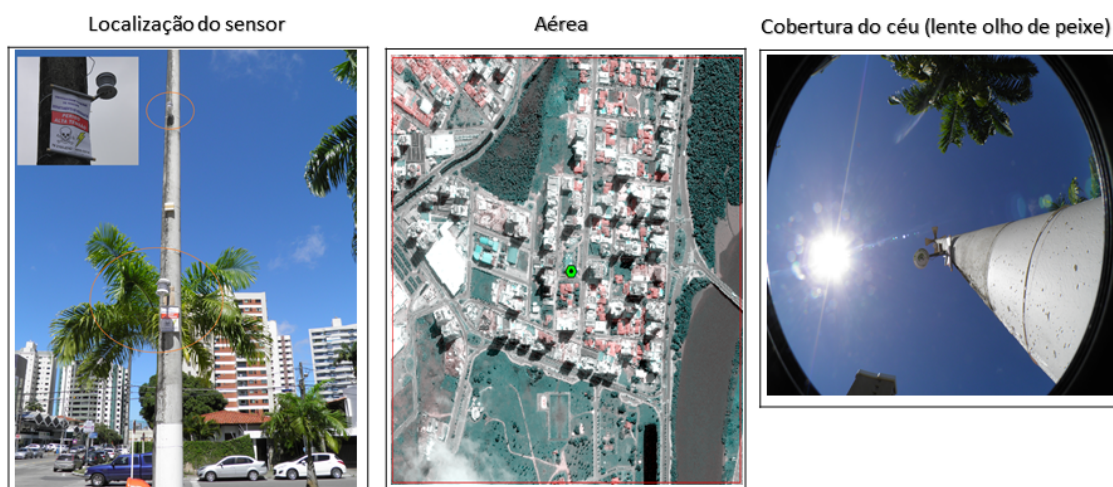
| | |
|--|---|
| População exposta ² : 55.470 | Predomínio do uso do solo: Residencial |
| Mudanças recentes do uso do solo desde então, não há. | |
| Gramado/superfície agrícola (irrigação): características ausentes ou quase nenhuma. | |
| Densidade do Tráfego: | Média diária do número de carros: |
| Tipo de superfície e material abaixo do sensor: pavimento de concreto | Material típico da rua: asfalto e concreto |
| Local: Rua espaçada com serviços e comércio. | Material típico do telhado: concreto |
| Fonte de aquecimento (externo): sim (ar condicionado) | Fonte de resfriamento: não |
| Campo de ventilação: possivelmente não. | |

¹Censo do bairro/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2010.

1.5 Remate das fotografias

| | |
|-----------------------|---|
| Localização do sensor | ✓ |
| Aérea | ✓ |
| Sky View Fator | ✓ |
| Direção cardinal | ✓ |
| Panorâmica | ✓ |
| Vídeo gravação | x |

Vídeo gravação da estação e ambiente envolvente (weblink): **indisponível, no momento.**





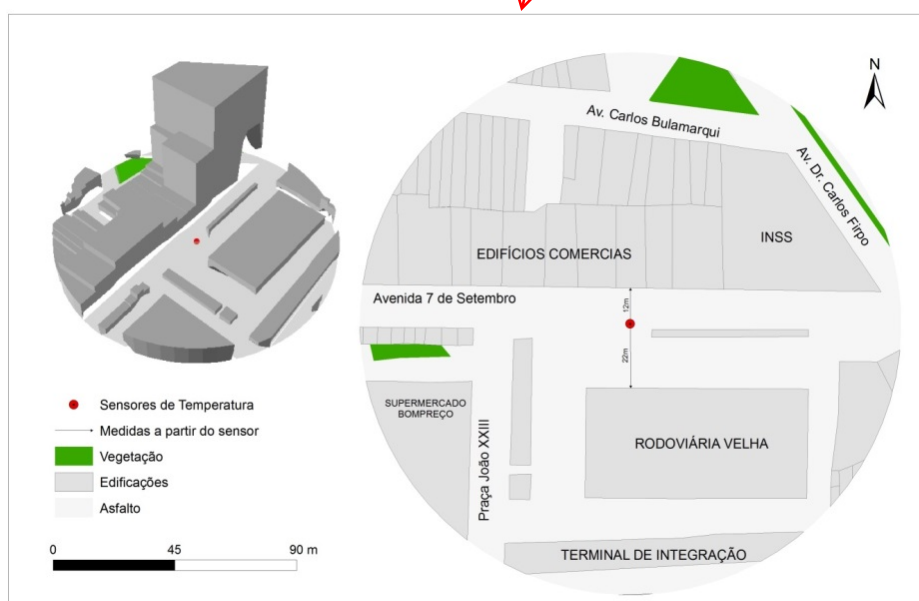
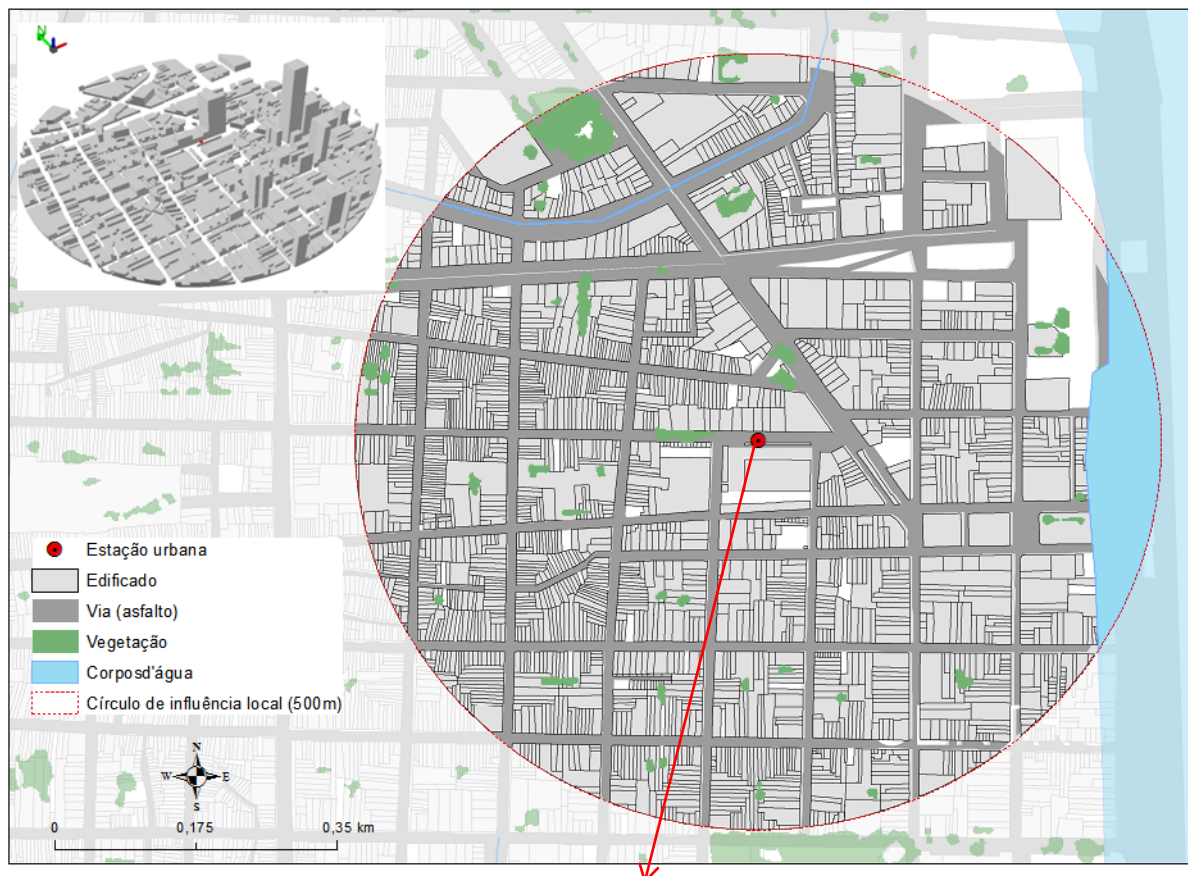
1.6 Registro histórico e manutenção (história do equipamento, mudanças no local de observação, erros identificáveis etc).

| Data | Descrições |
|------------|---|
| 19/07/2014 | <u>Instalação do sensor de temperatura</u> na praça Luciano Barreto Junior. Porém, <u>fora de funcionamento</u> devido ao problema técnico. |
| 01/10/2014 | 1ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 13/01/2015 | 2ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 10/04/2015 | 3ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 12/07/2015 | 4ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 18/11/2015 | 5ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 09/05/2016 | 6ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 10/10/2016 | 7ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos; <u>fehcmamento da estação urbana</u> |

2. Estação urbana - Centro da Cidade

| | | | |
|---|--|---------------------------------------|-----------------------------|
| Local/Código: Centro da cidade/CC | Data atualização: 19/07/2014 | Observador: Max Anjos | Versão: 1.0 |
|---|--|---------------------------------------|-----------------------------|

2.1 Mapa à escala local (*ciruculo de influência de 500m a partir do sensor*)



(*ciruculo de influência microclimática de 100m a partir do sensor*)

2.2 Informações específicas

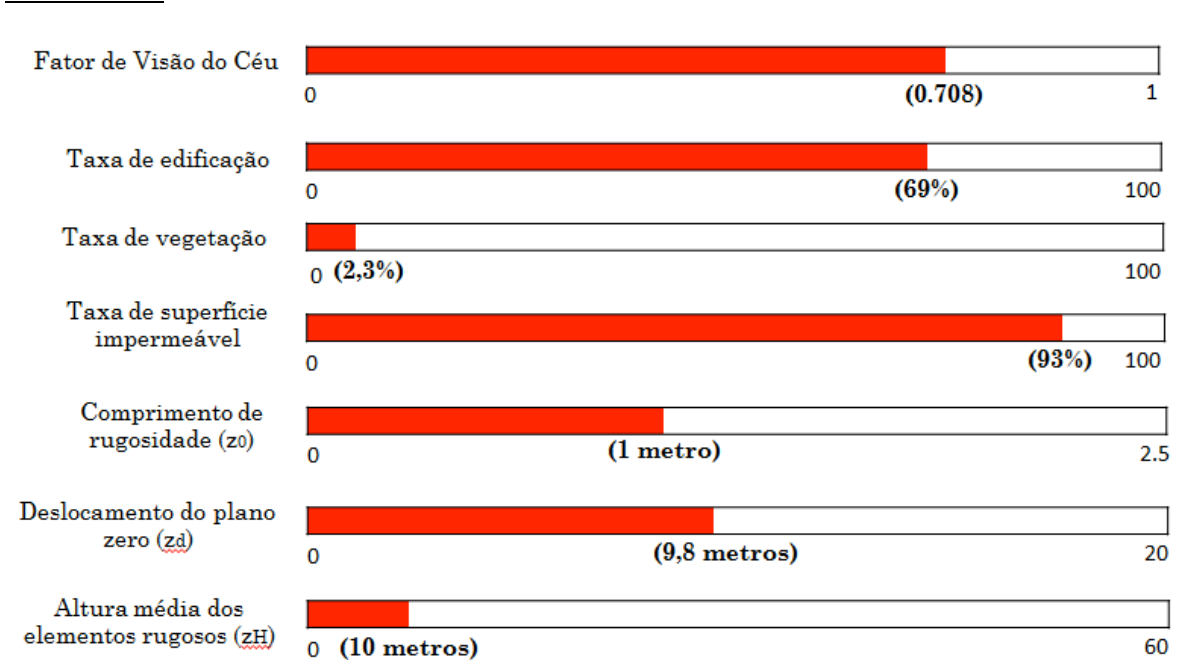
| | | |
|--|---|----------------------------------|
| Nome da estação: Centro da Cidade | Número de série: 10527634 | Autorizada: 01/10/2014 |
| Pseudônimo da estação: Tobias Barreto | Código da rede: ARA-CLIMA | Fechamento: 10/10/2016 |
| Tipo da estação: Sensor de temperatura | Distância em relação ao mar/rio: 500 m | Elevação: 11 metros |
| Tipo de local: Rua espaçada próximo ao terminal de integração. | Latitude: 10° 54' 30" S | Longitude: 37° 3' 10" W |
| Endereço: Avenida 7 de Setembro, Centro. | Contato | |
| | Instituição/pessoa*: xxxxxxxxxxxxxx | |
| Email*: xxxxxxxxxxxxxx | Tel/cel*: xxxxxxxxxxxxxx | |

* Informações privadas, não são repassadas aos usuários.

2.3 Classificação térmica

Local Climate Zona (LCZ)¹: **LCZ3 - (Ocupação compacta e edificações baixas)**
Mistura densa de edifícios médios (3 a 6 pavimentos); residências com até 3 pavimentos e edifícios espaçados com 15 pavimentos. Pouca presença de vegetação.

Parâmetros



¹Classificação térmica baseada em Stewart e Oke (2012)

²Fator de Visão do Céu, rugosidade aerodinâmica (Z_0 e Z_d) calculados a partir de (Gál e Unger, 2009, 2014; Unger et al., 2014).

2.4 Uso do solo e materiais de construção

| | |
|--|---|
| População exposta ² : 7.553 | Predomínio do uso do solo: Residencial e comercial/serviços. |
| Mudanças recentes do uso do solo desde então, não há. | |
| Gramado/superfície agrícola (irrigação): características ausentes ou quase nenhuma. | |
| Densidade do Tráfego: elevada | Média diária do número de carros ² : +200.000 |
| Tipo de superfície e material abaixo do sensor: concreto e asfalto | Material típico da rua: asfalto e concreto |
| Local: Rua espaçada com serviços e comércio. | Material típico do telhado: cerâmica e concreto |
| Fonte de aquecimento (externo): sim (ar condicionado) | Fonte de resfriamento: não |
| Campo de ventilação: Possivelmente que sim. Via sentido Leste-Oeste! | |

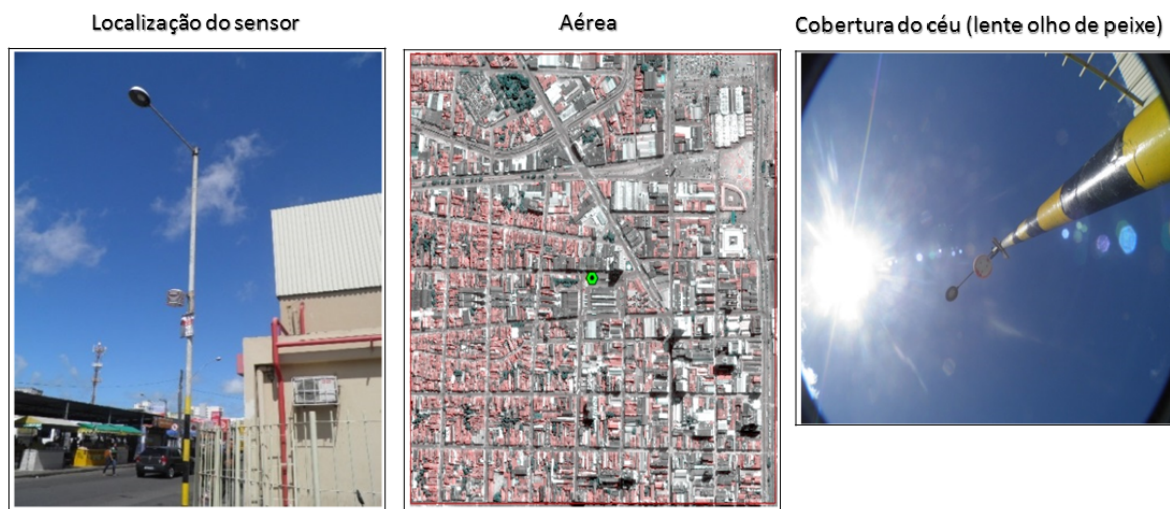
¹Censo do bairro/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2010.

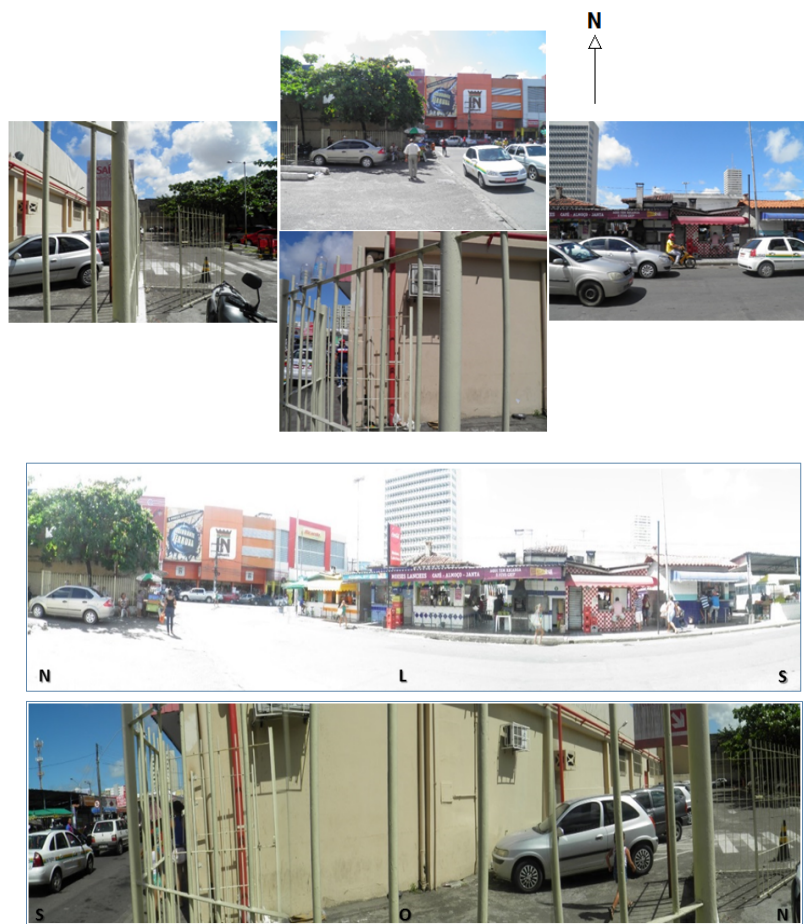
²Contagem de veículos (automóvel, caminhão e ônibus) para o dia 15/04/2015, Secretária Municipal de Transporte de Aracaju – SMTT.

2.5 Remate das fotografias

| | |
|-----------------------|---|
| Localização do sensor | ✓ |
| Aérea | ✓ |
| Sky View Fator | ✓ |
| Direção cardinal | ✓ |
| Panorâmica | ✓ |
| Vídeo gravação | x |

Vídeo gravação da estação e ambiente envolvente (weblink): **indisponível, no momento.**





2.6 Registro histórico e manutenção (história do equipamento, mudanças no local de observação, erros identificáveis etc).

| Data | Descrições |
|------------|--|
| 17/06/2014 | <u>Instalação do sensor termo-higrométrico</u> no estacionamento do supermercado Bompreço localizado na Praça João XXIII |
| 27/08/2014 | <u>Desativação do sensor termo-higrométrico</u> no estacionamento do Bompreço. <u>O motivo</u> , a imprudência de um funcionário do Bompreço. Os dados inexistentes. |
| 01/10/2014 | <u>Reinstalação e deslocamento do sensor térmico</u> para Avenida 7 de setembro próximo ao terminal de integração. |
| 13/01/2015 | 2ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 10/04/2015 | 3ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 12/07/2015 | 4ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 18/11/2015 | 5ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 09/05/2016 | 6ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 10/10/2016 | 7ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos; <u>fehcmameto da estação urbana</u> |

3. Estação urbana – Siqueira Campos

| | | | |
|--|--------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| Local/Código: Siqueira Campos/SCA | Data actualização: 19/07/2014 | Observador: Max Anjos | Versão: 1.0 |
|--|--------------------------------------|------------------------------|--------------------|

3.1 Mapa à escala local (*circulo de influência de 500m a partir do sensor*)



(*circulo de influência microclimática de 100m a partir do sensor*)

3.2 Informações específicas

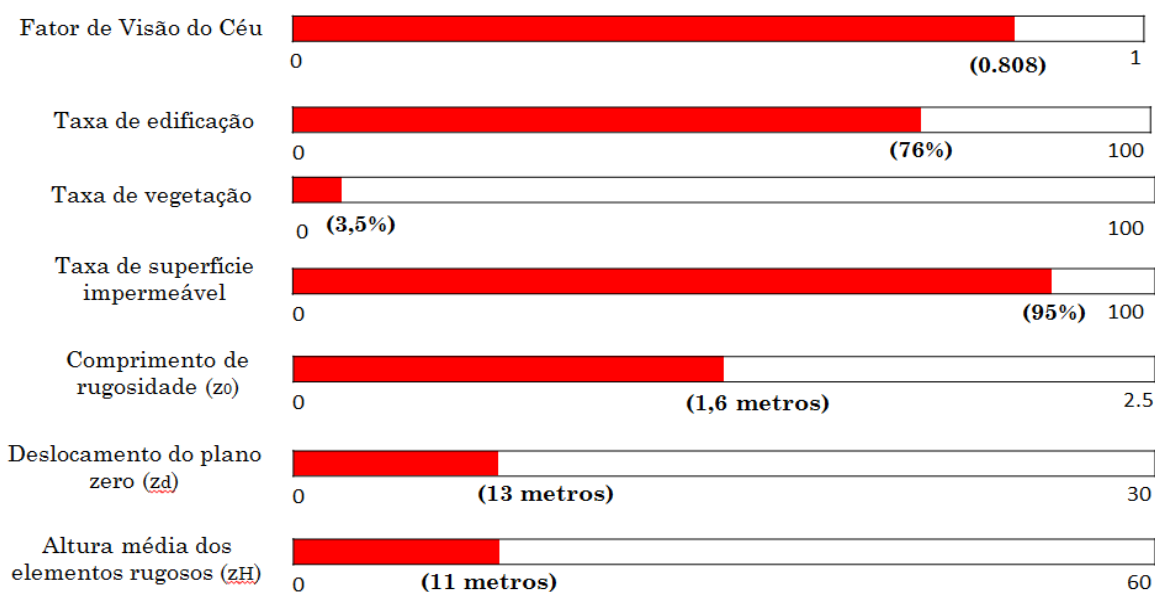
| | | |
|---|---|---|
| Nome da estação: Siqueria Campos | Número de série: 10527638 | Autorizada: 01/10/14 |
| Pseudônimo da estação: Maria Feliciana | Código da rede: ARA-CLIMA | Fechamento: 10/10/2016 |
| Tipo da estação: Sensor de temperatura | Distância em relação ao mar/rio: 8 km | Elevação: 12 metros |
| Tipo de local: Rua espaçada próximo ao posto de gasolina | Latitude: 10°54'30.11"S | Longitude: 37° 3'9.63"W |
| Endereço: Cruzamento entre a Avenida Osvaldo Aranha e Rua Paraíba | | Contato |
| Email*: xxxxxxxxxxxxxx | | Instituição/pessoa*: xxxxxxxxxxxxxx |
| | | Tel/cel*: xxxxxxxxxxxxxx |

* Informações privadas, não são repassadas aos usuários.

3.3 Classificação térmica

Local Climate Zona (LCZ)¹: [LCZ3 - \(Ocupação compacta e edificações baixas\)](#)
[Mistura densa de edifícios médios \(3 a 6 pavimentos\); residências com até 3 pavimentos. Pouca presença de vegetação.](#)

Parâmetros



¹Classificação térmica baseada em Stewart e Oke (2012)

²Fator de Visão do Céu, rugosidade aerodinâmica (Z₀ e Z_a) calculados a partir de (Gál e Unger, 2009, 2014; Unger et al., 2014).

3.4 Uso do solo e materiais de construção

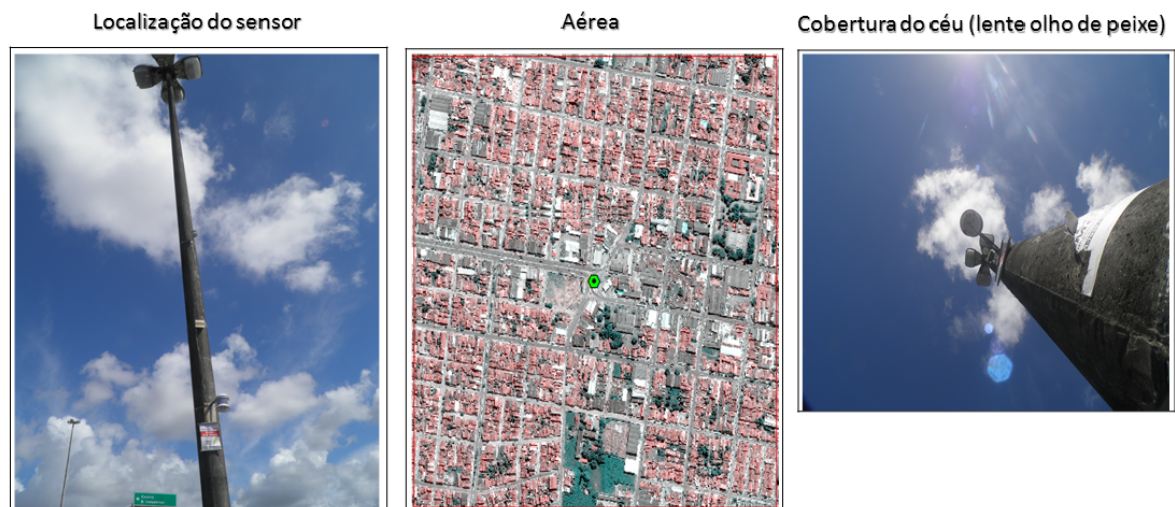
| | |
|--|--|
| População exposta ² : 14.525 | Predomínio do uso do solo: Residencial. |
| Mudanças recentes do uso do solo desde então, não há. | |
| Gramado/superfície agrícola (irrigação): características ausentes ou quase nenhuma. | |
| Densidade do Tráfego: -- | Média diária do número de carros: -- |
| Tipo de superfície e material abaixo do sensor: pavimento de concreto e relva | Material típico da rua: asfalto e concreto |
| Local: Rua espaçada com serviços e comércio. | Material típico do telhado: cerâmica e concreto |
| Fonte de aquecimento: -- | Fonte de resfriamento: -- |
| Campo de ventilação: -- | |

¹Censo do bairro/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2010.

3.5 Remate das fotografias

| | |
|-----------------------|---|
| Localização do sensor | ✓ |
| Aérea | ✓ |
| Sky View Fator | ✓ |
| Direção cardinal | ✓ |
| Panorâmica | ✓ |
| Vídeo gravação | x |

Vídeo gravação da estação e ambiente envolvente (weblink): **indisponível, no momento.**





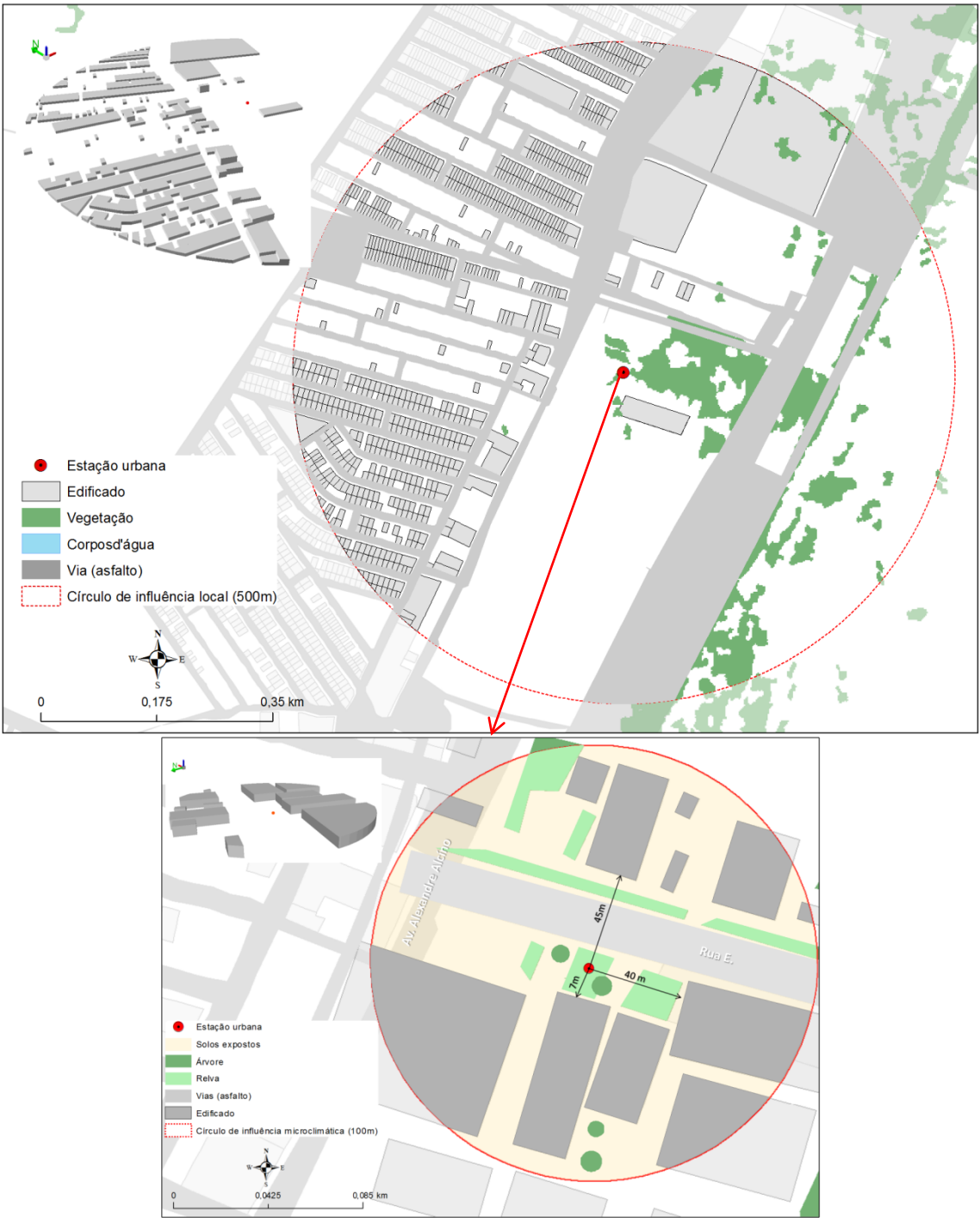
3.6 Registro histórico e manutenção (história do equipamento, mudanças no local de observação, erros identificáveis etc).

| Data | Descrições |
|------------|---|
| 01/10/2014 | <u>Instalação do sensor de temperatura</u> na Avenida Osvaldo Aranha cruzamento com a Rua Paraíba |
| 01/10/2014 | 1ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 13/01/2015 | 2ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 09/04/2015 | <u>Falta de dados</u> , falha no registro devido ao problema técnico |
| 12/07/2015 | 3ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 18/11/2015 | 4ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 09/05/2016 | 5ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 10/10/2016 | 6ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos; <u>fehcmamento da estação urbana</u> |

4. Estação urbana – Santa Maria

| | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------|
| Local/Código: Santa Maria/STM | Data actualização: 19/07/2014 | Observador: Max Anjos | Versão: 1.0 |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------|

4.1 Mapa à escala local (ciruculo de influência de 500m a partir do sensor)



(ciruculo de influência microclimática de 100m a partir do sensor)

4.2 Informações específicas

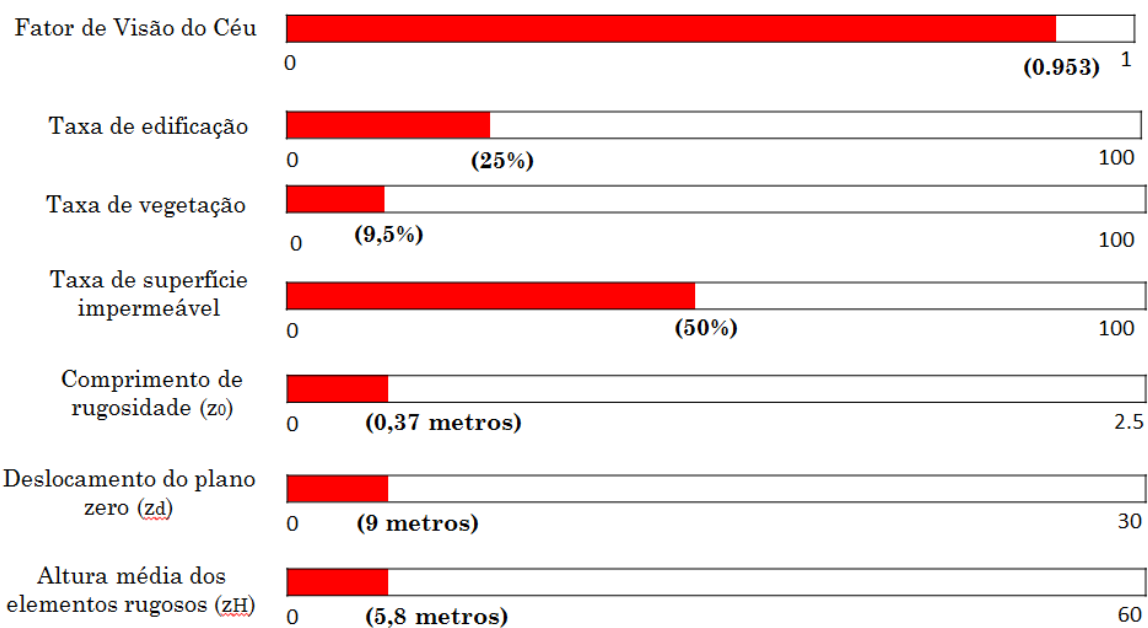
| | | |
|---|---|----------------------------------|
| Nome da estação: Santa Maria | Número de série: 10527632 | Autorizada: 19/07/2014 |
| Pseudônimo da estação: --- | Código da rede: ARA-CLIMA | Fechamento: 10/10/2016 |
| Tipo da estação: Sensor de temperatura | Distância em relação ao mar/rio: 4,8 km | Elevação: 7 metros |
| Tipo de local: Dentro do Colégio Estadual Santa Maria | Latitude: 10°59'20.04"S | Longitude: 37° 5'54.28"W |
| Endereço: Rua E, Santa Maria. | Contato Instituição/pessoa*: xxxxxxxxxxxxxx | |
| Email*: xxxxxxxxxxxxxx | Tel/cel*: xxxxxxxxxxxxxx | |

* Informações privadas, não são repassadas aos usuários.

4.3 Classificação térmica

Local Climate Zona (LCZ)¹: **LCZ7 - Ocupação desordenada e edificações baixas**
Mistura densa de baixos edifícios (3 pavimentos). Cobertura de superfícies permeáveis (vegetação e solo expostos) e alguma presença de superfície pavimentada (asfalto e concreto). Pouca presença de árvores

Parâmetros



¹Classificação térmica baseada em Stewart e Oke (2012)

²Fator de Visão do Céu, rugosidade aerodinâmica (Z₀ e Z_a) calculados a partir de (Gál e Unger, 2009, 2014; Unger et al., 2014).

4.4 Uso do solo e materiais de construção

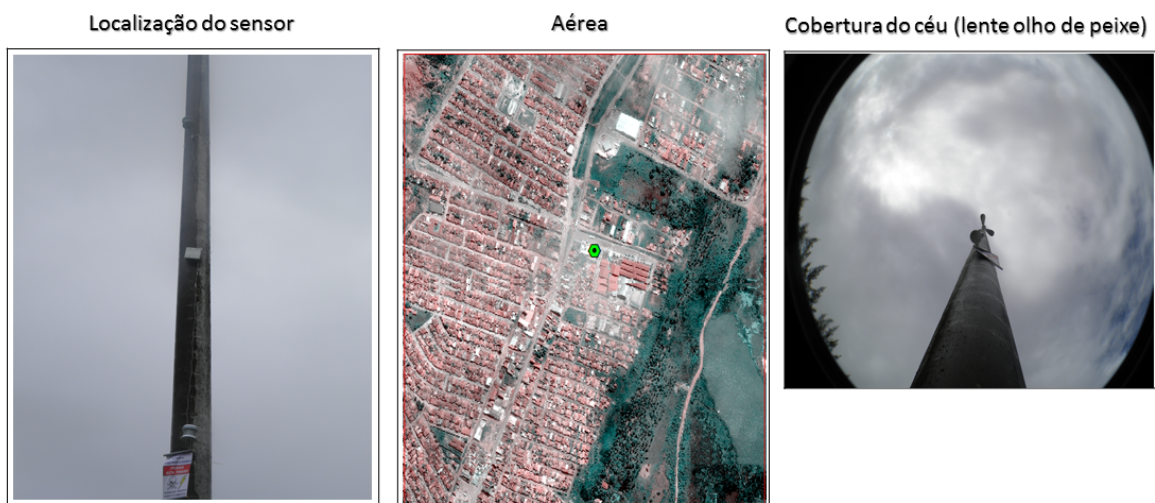
| | |
|--|--|
| População exposta ² : 33.475 | Predomínio do uso do solo: Residencial |
| Mudanças recentes do uso do solo desde então, não há. | |
| Gramado/superfície agrícola (irrigação): características presentes. | |
| Densidade do Tráfego: -- | Média diária do número de carros: --- |
| Tipo de superfície e material abaixo do sensor: relva | Material típico da rua: asfalto e concreto |
| Local: Espaço ocupado por obstáculos de concreto em volta do sensor | Material típico do telhado: cerâmica e concreto |
| Fonte de aquecimento: -- | Fonte de resfriamento: -- |
| Campo de ventilação: -- | |

¹Censo do bairro/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2010.

4.5 Remate das fotografias

| | |
|-----------------------|---|
| Localização do sensor | ✓ |
| Aérea | ✓ |
| Sky View Fator | ✓ |
| Direção cardinal | ✓ |
| Panorâmica | ✓ |
| Vídeo gravação | x |

Vídeo gravação da estação e ambiente envolvente (weblink): **indisponível, no momento.**





4.6 Registro histórico e manutenção (história do equipamento, mudanças no local de observação, erros identificáveis etc).

| Data | Descrições |
|------------|--|
| 17/06/2014 | <u>Instalação do sensor de temperatura</u> no Colégio Estadual Santa Maria |
| 01/10/2014 | 1ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 13/01/2015 | 2ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 10/04/2015 | 3ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 12/07/2015 | 4ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 18/11/2015 | 5ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 09/05/2016 | 6ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos |
| 10/10/2016 | 7ª <u>recolha de dados</u> e manutenção dos equipamentos; <u>fehcmamento da estação urbana</u> |

5. Estação urbana – Praia José Sarney

| | | | |
|--|--------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| Estação/Código: Praia José Sarney/PJS | Data actualização: 19/07/2014 | Observador: Max Anjos | Versão: 1.0 |
|--|--------------------------------------|------------------------------|--------------------|

5.1 Mapa à escala local (*circulo de influência de 500m a partir do sensor*)



(*circulo de influência microclimática de 100m a partir do sensor*)

5.2 Informações específicas

| | | |
|---|---|---|
| Nome da estação: Praia José Sarney | Número de série: 10527636 | Autorizada: 19/07/2014 |
| Pseudônimo da estação: --- | Código da rede: ARA-CLIMA | Fechamento: 10/10/2016 |
| Tipo da estação: Sensor de temperatura | Distância em relação ao mar/rio: 3 m | Elevação: 6 metros |
| Tipo de local: Rua espaçada próximo ao terminal de integração. | Latitude: 11° 1'11.67"S | Longitude: 37° 4'18.52"W |
| Endereço: Avenida Inácio Barbosa com Av. Dr. Sílvio Cabral Santana | | Contato Instituição/pessoa*: xxxxxxxxxxxxxx |
| Email*: xxxxxxxxxxxxxx | | Tel/cel*: xxxxxxxxxxxxxx |

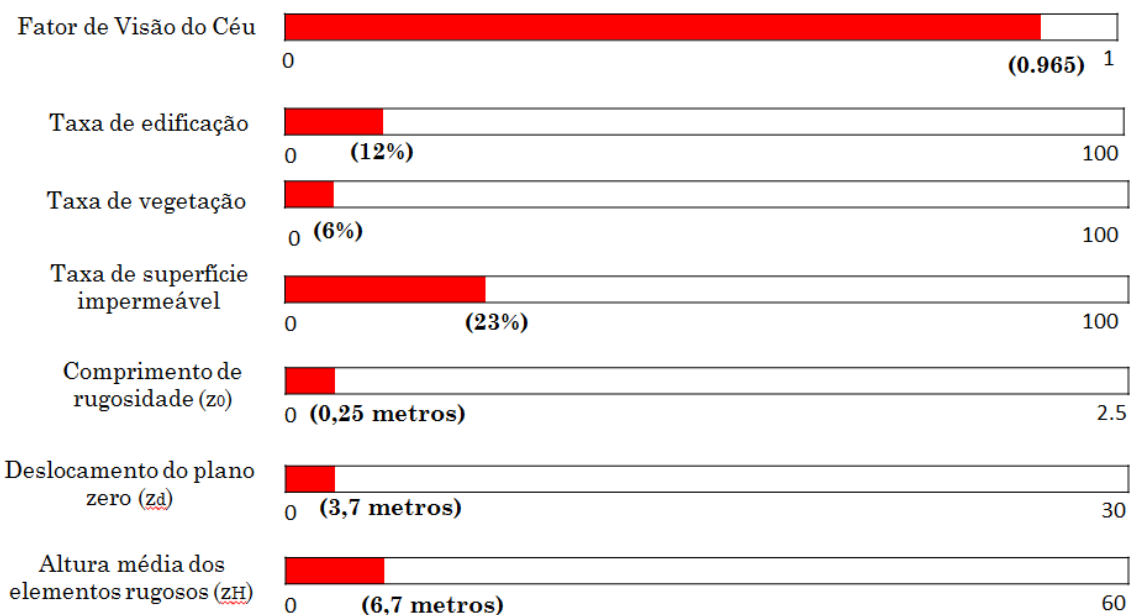
* Informações privadas, não são repassadas aos usuários.

5.3 Classificação térmica

Local Climate Zona (LCZ)¹: **LCZ6 - (Ocupação aberta e edificações baixas)**

Aglomerado de edifícios relativamente espaçados com até 3 pavimentos e com edifícios médios isolados. Cobertura do solo pavimentada (asfalto e concreto) e de superfícies permeáveis (vegetação, areia e solo expostos). Presença considerável de vegetação. Função residencial. Forte influência de corpos d'água (estuário do Rio Sergipe)

Parâmetros



¹Classificação térmica baseada em Stewart e Oke (2012)

²Fator de Visão do Céu, rugosidade aerodinâmica (Z₀ e Z_a) calculados a partir de (Gál e Unger, 2009, 2014; Unger et al., 2014).

5.4 Uso do solo e materiais de construção

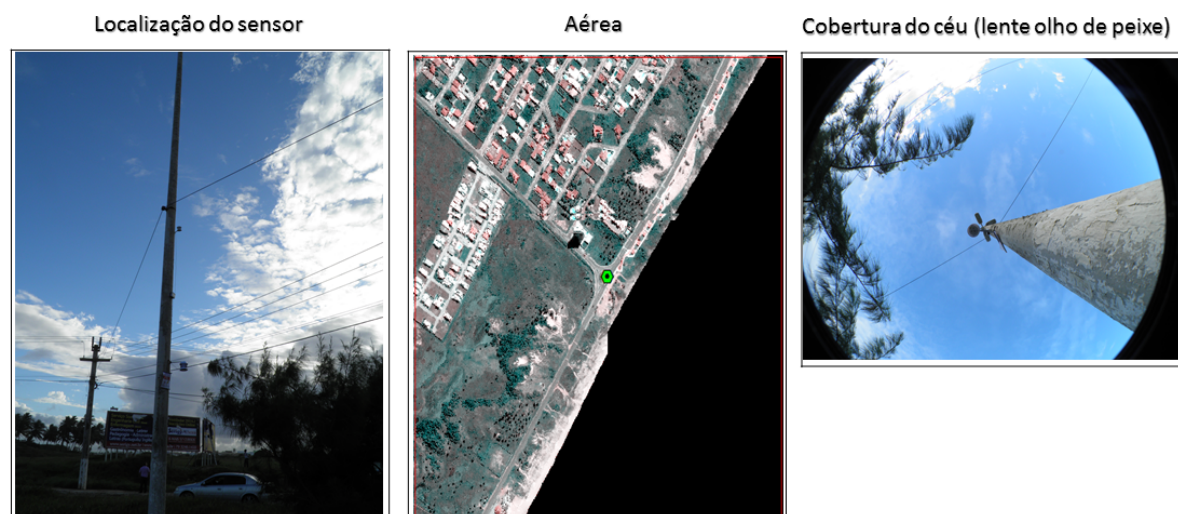
| | |
|---|--|
| População exposta ² : 18.871 | Predomínio do uso do solo: Residencial. |
| Mudanças recentes do uso do solo desde então, não há. | |
| Gramado/superfície agrícola (irrigação): características presentes. | |
| Densidade do Tráfego: -- | Média diária do número de carros: -- |
| Tipo de superfície e material abaixo do sensor: relva | Material típico da rua: asfalto e concreto |
| Local: Rua espaçada sem obstáculos a volta do sensor | Material típico do telhado: cerâmica e concreto |
| Fonte de aquecimento: -- | Fonte de resfriamento: -- |
| Campo de ventilação: Sim! Exposição direta aos ventos úmidos do mar. | |

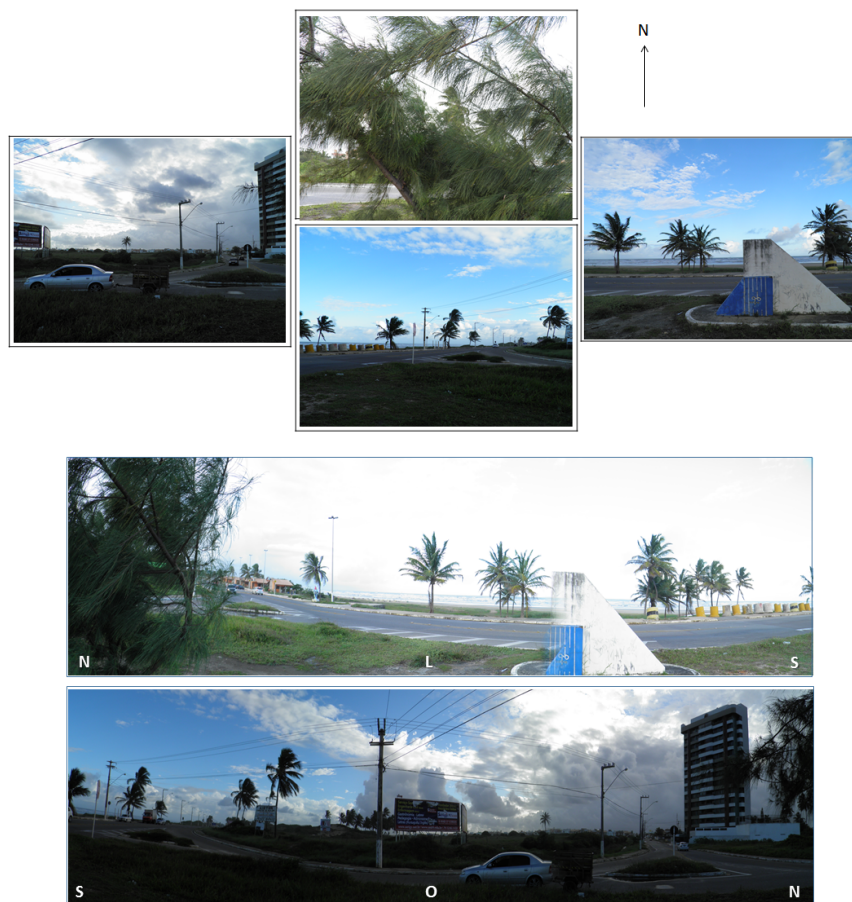
¹Censo do bairro/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2010.

5.5 Remate das fotografias

| | |
|-----------------------|---|
| Localização do sensor | ✓ |
| Aérea | ✓ |
| Sky View Fator | ✓ |
| Direção cardinal | ✓ |
| Panorâmica | ✓ |
| Vídeo gravação | x |

Vídeo gravação da estação e ambiente envolvente (weblink): **indisponível, no momento.**





5.6 Registro histórico e manutenção (história do equipamento, mudanças no local de observação, erros identificáveis etc).

| Data | Descrições |
|------------|--|
| 17/06/2014 | Instalação do sensor de temperatura na Avenida Inácio Barbosa com Av. Dr. Sílvio Cabral Santana (à beira do mar) |
| 01/10/2014 | 1ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 13/01/2015 | 2ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 10/04/2015 | 3ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 12/07/2015 | 4ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 18/11/2015 | 5ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 09/05/2016 | 6ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 10/10/2016 | 7ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos; fehcmameto da estação urbana |

6. Estação urbana – Zona de Expansão

| | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------|
| Estação/Código: Zona de Expansão/ZE | Data actualização: 19/07/2014 | Observador: Max Anjos | Versão: 1.0 |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------|

6.1 Mapa à escala local (ciruculo de influência de 500m a partir do sensor)



(ciruculo de influência microclimática de 100m a partir do sensor)

6.2 Informações específicas

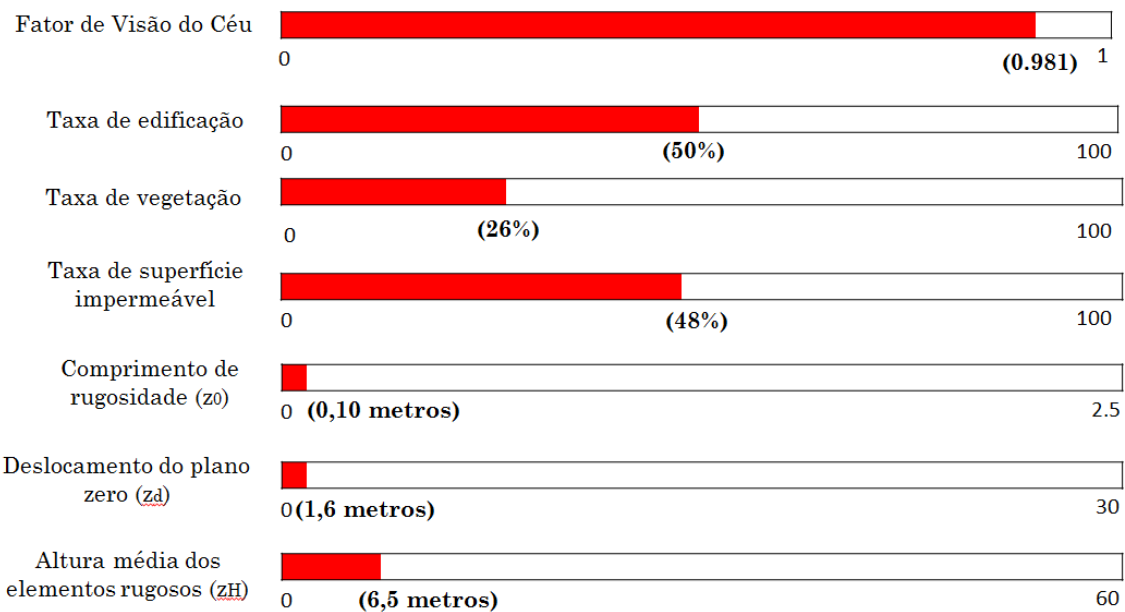
| | | |
|--|--|---|
| Nome da estação: Zona de Expansão | Número de série: 10529855 | Autorizada: 19/07/2014 |
| Pseudônimo da estação: --- | Código da rede: ARA-CLIMA | Fechamento: 10/10/2016 |
| Tipo da estação: Sensor de temperatura-umidade | Distância em relação ao mar/rio: 1,8 km | Elevação: 8 metros |
| Tipo de local: Rua espaçada próximo ao terminal de integração. | Latitude: 11° 5'51.53"S | Longitude: 37° 8'31.19"W |
| Endereço: Rodovia Ayrton Senna, Santo Antônio. | | Contato Instituição/pessoa*: xxxxxxxxxxxxxx |
| Email*: xxxxxxxxxxxxxx | | Tel/cel*: xxxxxxxxxxxxxx |

* Informações privadas, não são repassadas aos usuários.

6.3 Classificação térmica

Local Climate Zona (LCZ)¹: **LCZ9 - (Aglomerado urbana espaçada com áreas agrícolas)**
Aglomerado de edifícios espaçados com até 3 pavimentos. Forte presença da vegetação.
Cobertura de superfícies permeáveis. Função residencial e áreas agrícolas.

Parâmetros



¹Classificação térmica baseada em Stewart e Oke (2012)

²Fator de Visão do Céu, rugosidade aerodinâmica (Z₀ e Z_a) calculados a partir de (Gál e Unger, 2009, 2014; Unger et al., 2014).

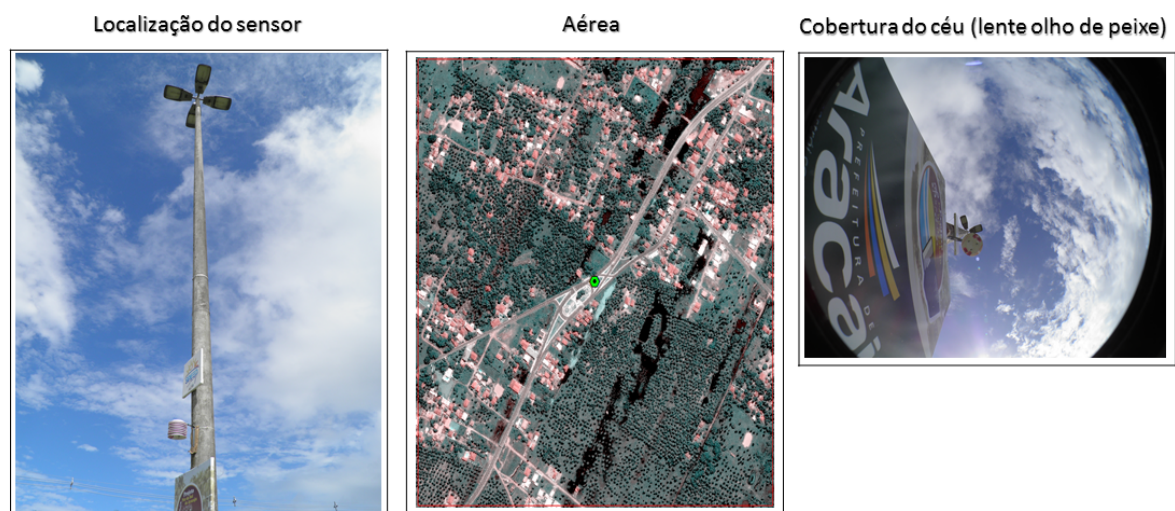
6.4 Uso do solo e materiais de construção

| | |
|--|--|
| População exposta ² : 12.459 | Predomínio do uso do solo: Residencial. |
| Mudanças recentes do uso do solo desde então, não há. | |
| Gramado/superfície agrícola (irrigação): características potencialmente presentes | |
| Densidade do Tráfego: -- | Média diária do número de carros: --- |
| Tipo de superfície e material abaixo do sensor: relva | Material típico da rua: asfalto e concreto |
| Tipo de construção: Rua espaçada sem obstáculos a volta do sensor | Material típico do telhado: cerâmica e concreto |
| Fonte de aquecimento: -- | Fonte de resfriamento: -- |
| Campo de ventilação: Possivelmente que sim! | |

6.5 Remate das fotografias

| | |
|-----------------------|---|
| Localização do sensor | ✓ |
| Aérea | ✓ |
| Sky View Fator | ✓ |
| Direção cardinal | ✓ |
| Panorâmica | ✓ |
| Vídeo gravação | x |

Vídeo gravação da estação e ambiente envolvente (weblink): **indisponível, no momento.**





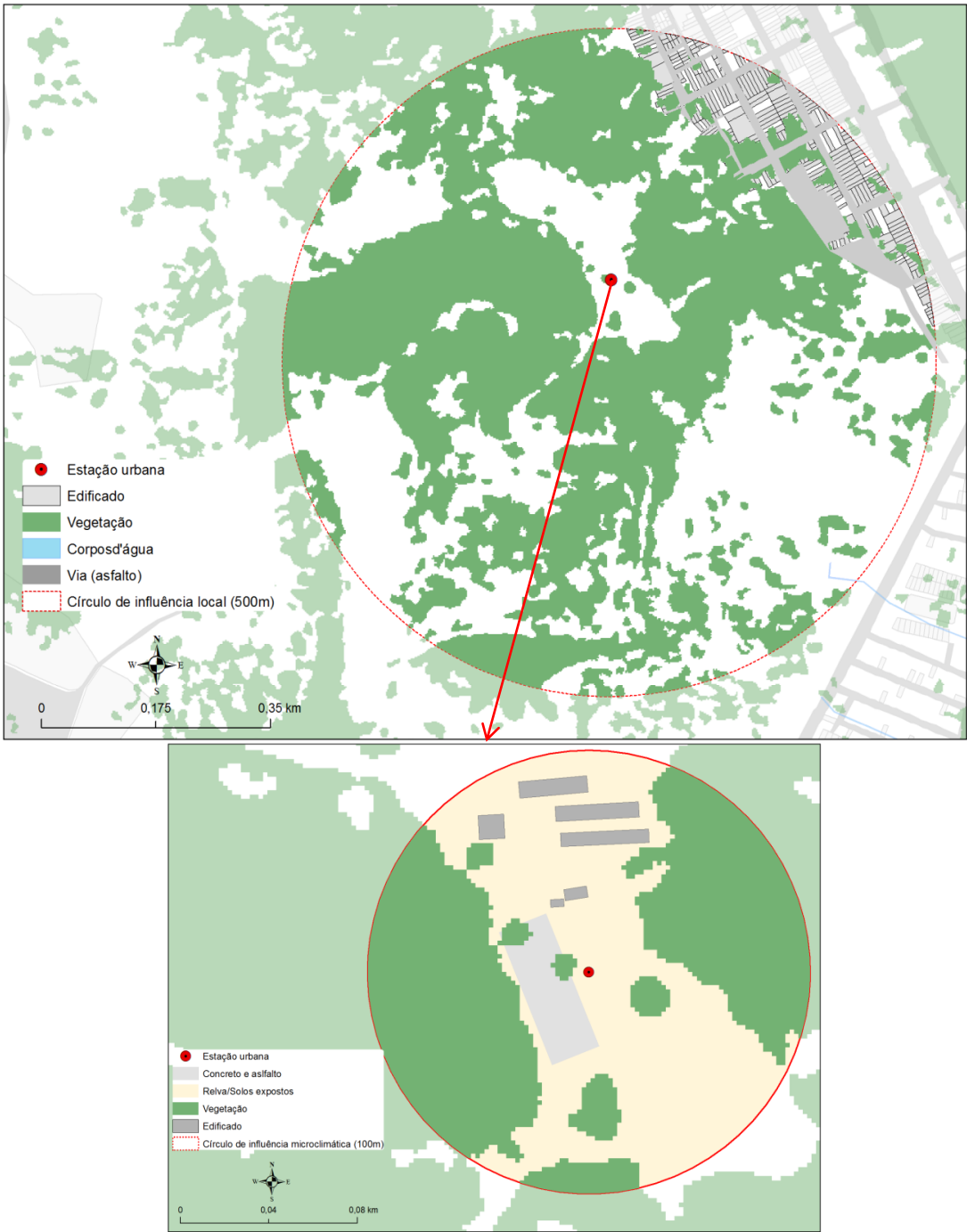
6.6 Registro histórico e manutenção (história do equipamento, mudanças no local de observação, erros identificáveis etc).

| Data | Descrições |
|------------|--|
| 17/06/2014 | Instalação do sensor termo-higrométrico na Avenida Airton Sena |
| 01/10/2014 | 1ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 13/01/2015 | 2ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 10/04/2015 | 3ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 12/07/2015 | 4ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 18/11/2015 | 5ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 09/05/2016 | 6ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 10/10/2016 | 7ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos; fehcmanto da estação urbana |

7. Estação urbana – Parque da Cidade

| | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------|
| Estação/Código: Parque da Cidade/PC | Data actualização: 19/07/2014 | Observador: Max Anjos | Versão: 1.0 |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------|

7.1 Mapa à escala local (ciruculo de influência de 500m a partir do sensor)







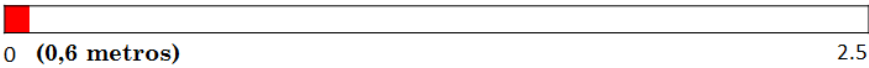


(ciruculo de influência microclimática de 100m a partir do sensor)

7.2 Informações específicas

| | | |
|--|---|----------------------------------|
| Nome da estação: Parque da Cidade | Número de série: 10529856 | Autorizada: 19/07/2014 |
| Pseudônimo da estação: --- | Código da rede: ARA-CLIMA | Fechamento: 10/10/2016 |
| Tipo da estação: Sensor de temperatura-umidade | Distância em relação ao mar/rio: 7,7 km | Elevação: 90 metros |
| Tipo de local: Espaço aberto dentro do parque urbano | Latitude: 10°52'51.80"S | Longitude: 37° 3'11.18"W |
| Endereço: Centro de Cavalaria da Polícia Municipal | Contato Instituição/pessoa*: xxxxxxxxxxxxxx | |
| Email*: xxxxxxxxxxxxxx | Tel/cel*: xxxxxxxxxxxxxx | |

* Informações privadas, não são repassadas aos usuários.

7.3 Classificação térmica

| | | |
|--|--|-----|
| Local Climate Zona (LCZ) ¹ : LCZA - (Vegetação densa) Vegetação densa de porte arbóreo, espécie originária do bioma Mata Atlântica | | |
| Parâmetros | | |
| Fator de Visão do Céu |  | 1 |
| Taxa de edificação |  | 100 |
| Taxa de vegetação |  | 100 |
| Taxa de superfície impermeável |  | 100 |
| Comprimento de rugosidade (z ₀) |  | 2.5 |
| Deslocamento do plano zero (z _d) |  | 30 |
| Altura média dos elementos rugosos (z _H) |  | 60 |

¹Classificação térmica baseada em Stewart e Oke (2012)

²Fator de Visão do Céu, rugosidade aerodinâmica (Z₀ e Z_d) calculados a partir de (Gál e Unger, 2009, 2014; Unger et al., 2014).

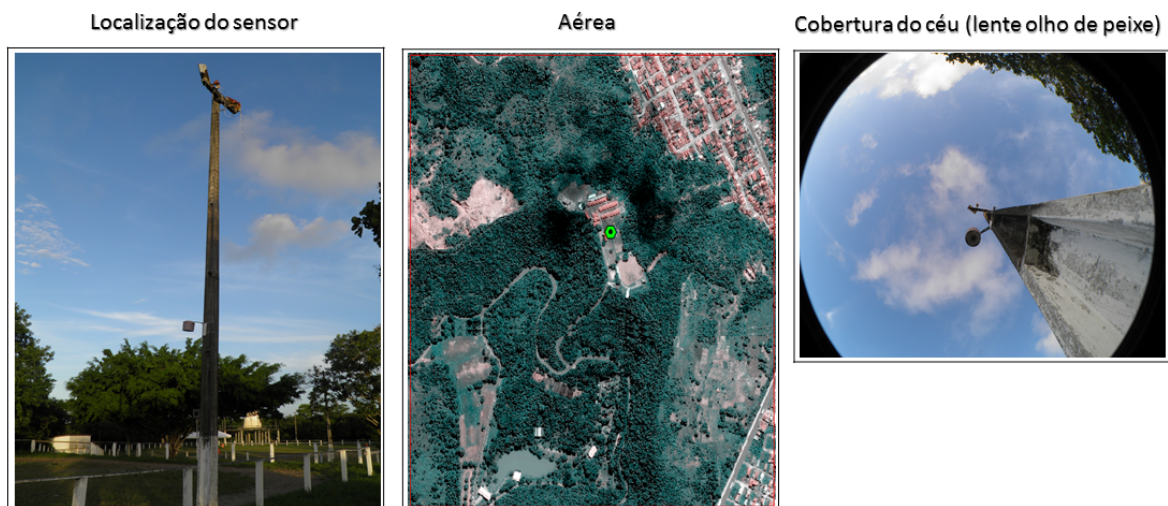
7.4 Uso do solo e materiais de construção

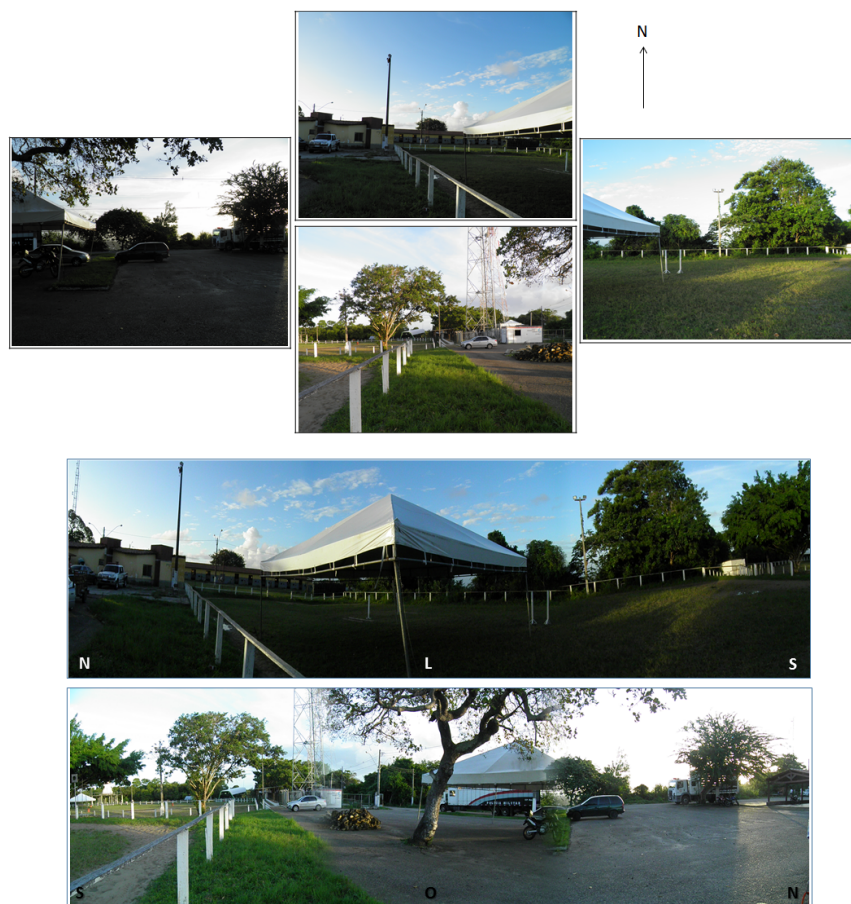
| | |
|--|---|
| População exposta: -- | Predomínio do uso do solo: recreativo |
| Mudanças recentes do uso do solo desde então, não há. | |
| Gramado/superfície agrícola (irrigação): características potencialmente presentes. | |
| Densidade do Tráfego: -- | Média diária do número de carros: -- |
| Tipo de superfície e material abaixo do sensor: relva, e asfalto | Material típico da rua: --- |
| Tipo de construção: Espaço aberto dentro de um parque urbano | Material típico do telhado: -- |
| Fonte de aquecimento: -- | Fonte de resfriamento: -- |
| Campo de ventilação: não. | |

7.5 Remate das fotografias

| | |
|-----------------------|---|
| Localização do sensor | ✓ |
| Aérea | ✓ |
| Sky View Fator | ✓ |
| Direção cardinal | ✓ |
| Panorâmica | ✓ |
| Vídeo gravação | x |

Vídeo gravação da estação e ambiente envolvente (weblink): [indisponível, no momento.](#)





7.6 Registro histórico e manutenção (história do equipamento, mudanças no local de observação, erros identificáveis etc).

| Data | Descrições |
|------------|---|
| 17/06/2014 | Instalação do sensor termo-higrométrico no Parque da Cidade |
| 01/10/2014 | 1ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 13/01/2015 | 2ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 10/04/2015 | 3ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 12/07/2015 | 4ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 18/11/2015 | 5ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 09/05/2016 | 6ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos |
| 10/10/2016 | 7ª recolha de dados e manutenção dos equipamentos; fechamento da estação urbana |

